



Aalto-yliopisto

Perustieteiden korkeakoulu

Teknillisen fysiikan ja matematiikan koulutusohjelma

Raul Kleinberg

**Ajasta riippuvien tekijöiden vaikutuksen  
arviointi todennäköisyyspohjaisessa  
riskianalyysissä**

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-insinöörin  
tutkintoa varten teknillisen fysiikan ja matematiikan koulutusohjelmassa.

Espoo, 5. syyskuuta 2014

Valvoja: Professori Ahti Salo

Ohjaaja: TkL Kalle Jänkä

*Työn saa tallentaa ja julkistaa Aalto-yliopiston avoimilla verkkosivuilla. Muilta osin kaikki oikeudet  
pidätetään.*

Aalto-yliopisto Perustieteiden korkeakoulu PL 11000, 00076 Aalto <a href="http://www.aalto.fi">http://www.aalto.fi</a>		DIPLOMITYÖN TIIVISTELMÄ	
Tekijä: Raul Kleinberg			
Työn nimi: Ajasta riippuvien tekijöiden vaikutuksen arviointi todennäköisyyspohjaisessa riskianalyyssissä			
Title in English: Evaluation of effect of time-dependent phenomena in probabilistic risk analysis			
Koulutusohjelma: Teknillisen fysiikan ja matematiikan koulutusohjelma			
Pääaine: Systeemi- ja operaatiotutkimus		Sivuaaine: Energiatieteet	
Opetusyksikön (ent. professuuri) koodi: Mat-2 Sovellettu matematiikka			
Työn valvoja: Professori Ahti Salo		Työn ohjaaja: TkL Kalle Jänkälä	
<p>Ydinvoimalaitosten todennäköisyyspohjaisessa riskianalyyssissä laskennan perustulos on ajasta riippumaton keskimääräinen arvio laitoksen sydänvauriotaajuudelle. Ajasta riippuvat analyysit tutkivat riskitason ja sydänvauriotaajuuden muutosta ajan funktiona ja pyrkivät määrittämään hetkellistä riskiä nostavia tekijöitä.</p> <p>Tässä diplomityössä määritetään Loviisa 1-voimalaitosyksikön ajasta riippuva sydänvauriotaajuus. Analyysit keskittyvät pääosin laitoksen tehoajolle ja lisäksi vuosihuollon aikainen aikariippuva sydänvauriotaajuus käsitellään lyhyesti. Tehoajolla ajasta riippuvat tekijät jakautuvat kahteen kategoriaan ja ne on valittu riskiperusteisesti tärkeysmittojen avulla. Ensimmäinen kategoria on laitoksen laitteiden yksittäis- ja yhteisvikojen perustapahtumat, joiden ajasta riippuva todennäköisyys muuttuu koestuskierron mukaan. Toinen kategoria on vuorokauden ja vuodenajan mukaan vaihtelevat perus- ja alkutapahtumat. Tapahtumat kuvaavat mm. meriveden pinnankorkeus-, tuuli-, levä-, salama- ja öljyriskien vaihtelua sekä työvuorojen vaihtumista laitoksella.</p> <p>Analyysit suoritetaan pääosin RiskSpectrum-ohjelmistolla ja muutamia analyysejä taulukkolaskentaohjelmistolla. Laskennassa tarvittavat parametrit määritetään voimalaitoksen kunnossapitohistorian avulla. Laskennan pohjana käytetään PSA13-riskimallia, joka kuvaa voimalaitosyksikön vuoden 2013 vuosihuollon jälkeistä tilaa.</p> <p>Tulosten perusteella Loviisa 1-voimalaitosyksikön sydänvauriotaajuudella on selvä aikariippuvuus. Verrattuna keskimääräiseen sydänvauriotaajuuteen tehoajolla koestuskiertojen huomiointi aiheuttaa noin kahdeksan prosentin vaihtelun sydänvauriotaajuuden aikasarjaan. Aikasarjassa tapahtuu vaihtelevaa piikittymistä viikon välein, koska kaikki alle vuoden koestusvälit ovat yhden viikon monikertoja. Lisäksi sydänvauriotaajuudessa on selkeä lineaarinen trendi yhden ja kahden vuoden koestuskiertojen takia. Peräkkäisten vuosien sydänvauriotaajuuksissa ei havaita merkittävää eroa.</p> <p>Vuodenaikariippuvat ilmiöt mallinnetaan kuukausiperusteisesti. Analyysien perusteella lokakuu, maaliskuu ja heinäkuu ovat korkeamman riskin kuukausia. Talvikuukaudet marraskuusta helmikuuhun ovat vastaavasti matalamman riskin kuukausia ja muut kuukaudet ovat lähellä sydänvauriotaajuuden keskiarvoa. Vuodenaikariippuvista tapahtumista merkittävin vaikutus on korkeaan meriveteen, voimakkaisiin tuuliin, voimakkaaseen salamointiin sekä erilaisiin samanaikaisiin luonnonilmiöihin liittyvillä alkutapahtumilla.</p> <p>Vuorokaudenaikariippuvista tapahtumista työvuorojen vaihtelu näkyy siten, että ilta- ja yövuoron aikaan riski on hieman koholla päivävuoroon verrattuna, koska mahdollisia turvallisuustoimenpiteitä on suorittamassa vähemmän henkilöstöä. Kaksi vuorottain kolmea riskiperusteisesti tärkeää moottoriventtiiliä koskevaa koestusta aiheuttaa sydänvauriotaajuuteen viikon välein toistuvan diskreetin piikin. Vuosihuollon aikaan ajasta riippuva sydänvauriotaajuus on koholla tehoajoon verrattuna ja vaihtelee seisokkivakiotilojen mukaan.</p> <p>Diplomityössä saavutettiin sille asetetut tavoitteet ja aikaisempia ajasta riippuvia tarkasteluita laajennettiin.</p>			
Päivämäärä: 5.9.2014		Kieli: suomi	
		Sivumäärä: 8+61	
Avainsanat: PRA, PSA, ydinvoima, ydinturvallisuus, aikariippuva, sydänvauriotaajuus, RiskSpectrum			

Aalto University School of Science PL 11000, 00076 Aalto <a href="http://www.aalto.fi">http://www.aalto.fi</a>		ABSTRACT OF THE MASTER'S THESIS	
Author: Raul Kleinberg			
Title: Evaluation of effect of time-dependent phenomena in probabilistic risk analysis			
Title in Finnish: Ajasta riippuvien tekijöiden vaikutuksen arviointi todennäköisyyspohjaisessa riskianalysissä			
Degree Programme: Engineering Physics and Mathematics			
Major: Systems and Operations Research		Minor: Energy Science	
Chair (code): Mat-2 Applied Mathematics			
Supervisor: Professor Ahti Salo		Instructor: Kalle Jänkälä, Lic.Sc (Tech.)	
<p>The basic result of probabilistic risk assessment of a nuclear power plant is a stationary estimate of the core damage frequency. Time-dependent analyses aim to evaluate the risk level and core damage frequency as a function of time and aim to identify factors that increase the temporal risk.</p> <p>This master's thesis determines the time-dependent core damage frequency of the Loviisa-1 nuclear power plant unit. Analyses focus mainly on the power operation of the plant and time-dependent core damage frequency during planned outage is also discussed shortly. The time-dependent phenomena are divided into two categories during power operation and risk-based selection is made using importance measures. The first category is the basic events that cover single failures and common-cause-failures and their probability varies over time due to testing cycle. The second category is basic events and initiating events that vary based on time of the day or time of the year. Events describe for example variations in sea level, wind, algae, lightning and oil risks as well as work shifts at the plant.</p> <p>Calculations are mainly performed with RiscSpectrum software and also spreadsheet software is used in some analyses. Necessary parameters are defined using maintenance history of the plant. The base of the calculation is PSA13-risk model which describes the state of the plant after the year 2013 scheduled outage.</p> <p>Based on the results the core damage frequency of the Loviisa-1 unit is clearly time-dependent. Compared to the average core damage frequency during power operation the testing cycles cause circa 8 percent variation in the core damage frequency time series. Peaks in the time series can be observed on one week interval because all the test cycles are multiples of one week. In addition a clear linear trend exists in core damage frequency due to one and two year test cycles. Core damage frequencies of consecutive years do not differ significantly.</p> <p>Phenomena varying during the year were modelled on monthly basis. Based on the results the risk is higher during October, March and July. During the winter months from November to February risk is lower and in other months close to the average of the core damage frequency. The most significant events are related to high sea level, strong winds, powerful lightning and simultaneous natural events.</p> <p>As time of the day dependent events, work shifts cause the risk to be slightly higher during evening and night shift compared to day shift. The reason is greater amount of personnel at the plant during day shift which enables completion of safety related tasks more certainly. Two alternately performed equipment tests concerning three risk significant motor operated valves result in weekly discreet peaks in the core damage frequency time series. During scheduled outage the risk varies depending on the shutdown state and is higher compared to the core damage frequency during power operation.</p> <p>The objectives of the master's thesis were achieved and previous time-dependent analyses were expanded.</p>			
Date: 5.9.2014		Language: Finnish	
		Number of pages: 8+61	
Keywords: PRA, PSA, nuclear power, nuclear safety, time-dependent, core damage frequency, RiskSpectrum			

## Esipuhe

Diplomityö on kirjoitettu Fortum Power and Heat Oy:ssä ydinturvallisuusosaston PRA-ryhmässä. Aloitin diplomityön vuoden 2014 alussa. Tarvittavan tiedon hankkiminen, laskenta ja tulosten valmistuminen keskittyivät kevään ajalle ja varsinainen kirjoittaminen kesälle 2014.

Kiitokset kuuluvat PRA-ryhmän vetäjälle TkL Kalle Jänkälälle mielenkiintoisesta aiheesta, hyvistä ohjeista sekä diplomityön asiantuntevasta ohjauksesta. Lisäksi haluan kiittää työn valvojaa Systeemianalyysin laboratorion professori Ahti Saloa yhteistyöstä ja arvokkaista kommentteista.

Kiitos kuuluu myös PRA-ryhmän työtovereilleni mukavasta työilmapiiristä ja jatkuvasta tuesta työn edetessä.

Espoossa, 5. syyskuuta 2014

*Raul Kleinberg*

## Sisällysluettelo

Esipuhe.....	iii
Lyhenteet ja sanasto.....	vi
Johdanto.....	1
1.1. Työn tavoite.....	2
1.2. Työn rakenne ja rajaukset.....	3
Loviisan ydinvoimalaitos.....	4
2.1. Toimintaperiaate.....	4
2.2. Ydinturvallisuus.....	5
2.3. Loviisan turvallisuusjärjestelmät.....	7
Todennäköisyyspohjainen riskianalyysi.....	9
3.1. Luotettavuusmallit.....	11
3.2. Tärkeysmitat.....	15
3.3. Loviisan PRA-malli.....	16
Ajasta riippuvat tekijät.....	19
4.1. Yksittäisviat.....	19
4.2. Yhteisviat.....	22
4.3. Vuodenaikariippuvuudet.....	22
4.4. Koestuksen aikainen epäkäytettävyys.....	24
4.5. Päivä-, ilta- ja yövuoron vaikutus.....	24
4.6. Vuosihuollon aikainen riski.....	25
Menetelmät.....	27
5.1. Yksittäisvikojen aikariippuvuus.....	27
5.2. Yhteisvikojen aikariippuvuus.....	33

5.3.	Vuodenaikariippuvuuksien mallintaminen .....	33
5.4.	Sydänvauriotaajuuden laskenta .....	41
5.5.	Koestuksien aikainen epäkäytettävyys ja työvuorojen vaikutus.....	42
5.6.	Seisokkitilojen sydänvauriotaajuus .....	43
	Tulokset ja johtopäätökset.....	44
6.1.	Koestusvälit .....	44
6.2.	Vuodenaikatekijät .....	47
6.3.	Työvuorot.....	50
6.4.	Koestuksien aikainen riski .....	51
6.5.	Vuosihuolto .....	52
	Yhteenveto ja jatkotutkimusmahdollisuudet.....	53
	Lähteluettelo .....	57
	Liitteet.....	60
	Liite 1: Vuodenaikariippuvien perustapahtumien kuukausikohtaiset todennäköisyydet.....	60
	Liite 2: Vuodenaikariippuvien alkutapahtumien kuukausikohtaiset taajuudet .....	61

## Lyhenteet ja sanasto

ALARA	As Low As Reasonably Achievable
AM-1	Atom Mirny – rauhanomainen atomi
CDF	Core Damage Frequency, sydänvauriotaajuus
Cs	Cesium
EBR-1	Experimental Breeder Reactor
FSAR	Final Safety Analysis Report
FV	Fussell-Vesely (tärkeysmita)
IAEA	International Atomic Energy Agency
IEA	International Energy Agency
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
INSAG	International Nuclear Safety Advisory Group
LO1/LO2	Loviisa 1/2-voimalaitosyksikkö
MKJ	Minimikatkosjoukko
MW	Megawatti
NEA	Nuclear Energy Agency
NRC	Nuclear Regulatory Commission
OECD	Organisation for Economic Cooperation and Development
PRA	Probabilistic Risk Assessment
PSA	Probabilistic Safety Assessment
RAW	Risk Achievement Worth (tärkeysmita, toiselta nimeltään RIF)
RDF	Risk Decrease Factor (tärkeysmita, toiselta nimeltään RRW)
RIF	Risk Increase Factor (tärkeysmita, toiselta nimeltään RAW)

RRW	Risk Reduction Worth (tärkeysmita, toiselta nimeltään RDF)
SAHARA	Safety As High As Reasonably Achievable
STUK	Säteilyturvakeskus
Tbq	Terabecquerel
TTKE	Turvallisuustekniset käyttöehdot
VVER	Vodo-Vodyanoi Energetichesky Reaktor, vesi-vesi energiareaktori
WNA	World Nuclear Association
YVL-ohje	Ydinvoimalaitosohje



# Luku 1

## Johdanto

Ydinvoiman käyttö energiantuotannossa perustuu hallittuun ketjureaktioon. Uraaniatomien ytimiä pommitetaan neutroneilla, mikä johtaa ytimien halkeamiseen. Halkeamisessa vapautuu lisää neutroneita, jotka halkaisevat edelleen lisää uraaniytimiä ja ketjureaktio jatkuu. Jokaisen ytimen halkeamisen yhteydessä vapautuu myös ytimen sidosenergiaa, mikä mahdollistaa energiantuotannon.

Ydinvoima ihmiskunnan energiantuotantomuotona on noin kuusikymmentä vuotta vanha. Ennen toista maailmansotaa ja sen aikana ydinfissiota hyödynnettiin lähinnä sotilaallisiin tarkoituksiin, mutta toisen maailmansodan jälkeen rauhanomainen käyttö kehittyi. Vuonna 1951 ydinsähköllä valaistiin Yhdysvalloissa Arcossa neljä hehkulamppua kokeellisella EBR-1 ydinreaktorilla. (ICJT, 2014) Obninskissa Venäjällä ensimmäinen siviilikäyttöön suunniteltu ydinreaktori AM-1 otettiin käyttöön vuonna 1954. Kyseisen reaktorin lämpöteho oli 30 megawattia ja sähköteho 5 megawattia. (WNA, 2014)

Iso-Britanniassa käynnistettiin ensimmäinen kaasujäähdytteinen reaktori 1956 ja samana vuonna ensimmäinen kaupallinen painevesilaitos aloitti toimintansa Yhdysvalloissa. Ensimmäinen kaupallinen kiehumavesilaitos otettiin käyttöön 1960 Yhdysvalloissa. Ensimmäiset ydinvoimalaitokset rakennettiin Kanadaan vuonna 1962 ja Ranskaan vuonna 1965. (ICJT, 2014)

Ydinvoimakapasiteetti kasvoi maailmassa 60-luvulta 90-luvulle asti. (WNA, 2014) 2000-luvulla tuotannon trendi on ollut lievästi laskeva. Ydinvoiman kehitystä ovat varjostaneet Three Mile Islandin, Tšernobylin ja Fukushima ydinonnettomuudet.

Ydinvoiman osuus on tällä hetkellä noin 13 prosenttia maailman sähköntuotannosta. (IEA, 2012) Ydinvoima on maailman kolmanneksi merkittävin sähköntuotantomuoto fossiilisten polttoaineiden ja vesivoiman jälkeen. Ydinsähköä tuottavia maita on maailmassa 30. Reaktoreita on toiminnassa yhteensä 433 kappaletta ja ne ovat keskittyneet Eurooppaan, Pohjois-Amerikkaan ja Aasiaan. (WNA, 2014)

Suomen ensimmäisen ydinvoimalaitoksen rakentaminen alkoi vappuna 1971. Ensimmäinen laitosyksikkö Loviisa 1 valmistui sähköntuotantoon 1977 ja toinen yksikkö Loviisa 2 vuonna 1981. Olkiluodon ydinvoimalaitoksen yksiköt Olkiluoto 1 ja Olkiluoto 2 kytkettiin verkkoon vuosina 1979 ja 1982. (Michelsen & Särkikoski, 2005)

Ydinvoiman osuus vuonna 2013 Suomen sähköntuotannosta oli 33,3 prosenttia, mikä tekee siitä merkittävimmän sähköntuotantomuodon Suomessa. (Energiateollisuus ry, 2014) Ydinsähköä tuotetaan Loviisan ydinvoimalaitoksen kahdella yksiköllä ja Olkiluodon voimalaitoksen kahdella yksiköllä. Teollisuuden Voima rakentaa Olkiluotoon kolmatta laitosyksikköä. Lisäksi Teollisuuden Voimalla on periaatepäätös neljännen yksikön rakentamisesta Olkiluotoon ja Fennovoimalla ensimmäisen laitosyksikön rakentamisesta Pyhäjoelle.

## 1.1. Työn tavoite

Loviisan ydinvoimalaitoksen todennäköisyyspohjaisen riskianalyysin peruslaskennan tuloksena saadaan laitoksen sydänvauriotaajuuden arvio. Laskennan tulos on keskimääräinen arvio, joten hetkellinen epäkäytettävyys voi poiketa merkittävästikin keskimääräisestä arviosta (Hilsmeier, et al., 1995).

Ajasta riippuvilla analyyseillä pyritään tunnistamaan tekijöitä, jotka kasvattavat hetkellistä epäkäytettävyttä. (Rösli, 1995) Tällaisia tekijöitä voivat olla mm. laitteiden koestusvälien pituudet, erilaiset vuodenaikariippuvuudet tai vuorokaudenaikariippuvuudet. Koestusvälien kohdalla voidaan tarkastella sekä yksittäis- että yhteisvikojen aikariippuvuuksia sekä koestuksien aikaisia epäkäytettävyksiä. Vuodenaikariippuvuuksiin voidaan laskea mm. meriveden korkeuden vaihtelut, levän muodostuminen, myrskyt ja salamointi.

Ajasta riippuvat analyysit suoritetaan RiskSpectrum-ohjelmistolla, joka sisältää Loviisan ydinvoimalaitoksen koko vika- ja tapahtumapuumallin. Ohjelmistolla on mahdollista laskea sekä järjestelmien keskimääräisiä että hetkellisiä epäkäytettävyksiä. Ajasta riippuvat analyysit kytkeytyvät laajempaan kokonaisuuteen, Loviisan riskitutkimuksen epävarmuuksien arviointiin. Ajasta

riippuvia tarkasteluja on suoritettu Loviisan laitoksen riskitutkimuksessa viimeksi yhdeksänkymmentäluvun alussa (Andsten & Kovanen, 1990).

## **1.2. Työn rakenne ja rajaukset**

Työn luvussa 2 esitellään Loviisan ydinvoimalaitoksen toimintaperiaate ja luvussa 3 todennäköisyyspohjaisen riskianalyysin peruseriaatteet. Luvussa 4 on käsitellään työssä tarkastellut ajasta riippuvat tekijät. Luku 5 esittää analyyseissä tarvittavat menetelmät. Lukuun 6 kerätään analyysien tulokset ja analyyseistä vedettävät johtopäätökset. Luku 7 sisältää työn yhteenvedon sekä jatkotutkimusmahdollisuudet.

Työn aihetta rajataan siten, että ajasta riippuvat tarkastelut tehdään pääosin ydinvoimalaitoksen tehoajolle, mutta myös vuosihuoltoon liittyvät seisokkitilat tarkastellaan lyhyesti. Loviisan ydinvoimalaitoksen kahdesta laitosesiköstä tarkastellaan vain Loviisa 1:tä. Lisäksi tarkasteluun valitaan riskiperusteisesti tietyt järjestelmät ja laitteet sekä laitteiden ja komponenttien vikaantumistavat. Rajauksia käsitellään tarkemmin kappaleessa 4.

## Luku 2

### Loviisan ydinvoimalaitos

Loviisan ydinvoimalaitos sijaitsee Hästholmenin saarella lähellä Loviisan kaupunkia. Ydinvoimalaitoksen noin kymmenen vuotta kestänyt rakentaminen oli aikanaan suuri kansainvälinen hanke, jossa kahden neuvostoliittolaisen VVER-440-tyyppisen painevesireaktorin ympärille rakennettiin länsimaiset turvallisuusstandardit täyttävä tekniikka. (Michelsen & Särkikoski, 2005)

Voimalaitoksella on tuotettu ydinsähköä jo yli kolmekymmentä vuotta ja toiminnan on suunniteltu jatkuvan vielä useita vuosia. Laitosyksiköiden käyttöluvut ulottuvat vuosiin 2027 (Loviisa 1) ja 2030 (Loviisa 2). (Fortum Generation, ei pvm) Nykypäivänä voimalaitoksen vuosituotanto on noin 8 terawattituntia, mikä vastaa kymmenesosaa Suomen sähkönkulutuksesta. Vuonna 2012 laitoksen kummankin yksikön lämpöteho oli 1500 megawattia ja sähköteho 496 MW, joten laitoksen hyötysuhde on noin 33 prosenttia.

Loviisan ydinvoimalaitoksella on periaatteena jatkuva ydinturvallisuuden parantaminen. Korkea turvallisuuskulttuuri heijastuu mm. laitoksen luotettavuuteen, mikä näkyy korkeissa käyttökertoimissa<sup>1</sup>. Esimerkiksi vuonna 2013 Loviisan voimalaitoksen käyttökerroin oli 92,5 prosenttia, mikä on kansainvälisessä vertailussa erittäin korkea (Fortum Keilaniemi, 2014).

#### 2.1. Toimintaperiaate

Suurin osa maailman ydinvoimalaitoksista on kevytvesireaktoreita, joissa tavallinen vesi toimii sekä hidastimena että jäähdytteenä. Kevytvesireaktorit jakautuvat edelleen kiehutusvesireaktoreihin ja painevesireaktoreihin. Kiehutusvesireaktorissa reaktori ja turbiini ovat samassa piirissä ja reaktorissa

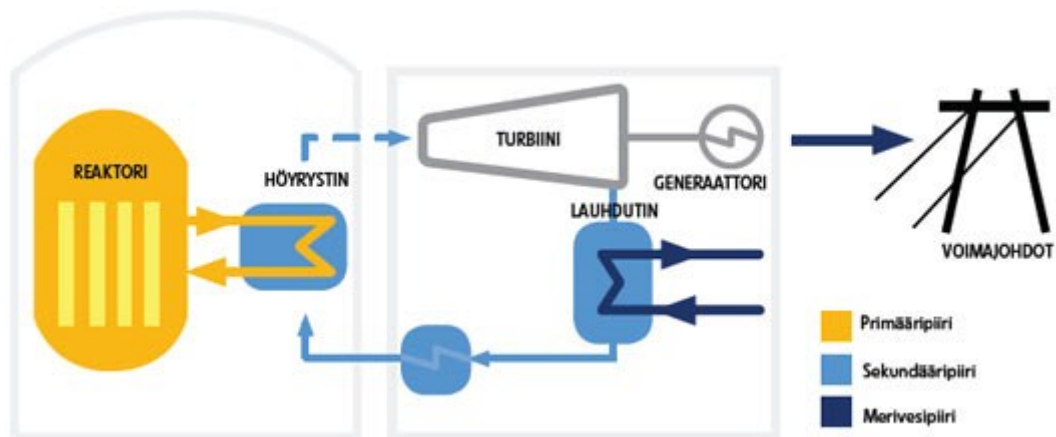
---

<sup>1</sup> Käyttökerroin on voimalaitoksen todellisen tuotannon suhde potentiaaliseen tuotantoon. Potentiaalinen tuotanto saavutettaisiin, jos voimalaitos kävisi jatkuvasti nimelliskapasiteetilla.

muodostunut höyry ohjataan suoraan turbiinille. Painevesireaktorissa reaktori ja turbiini ovat erillisissä primääri- ja sekundääripiireissä ja höyry tuotetaan höyrystimissä.

Loviisan ydinvoimalaitoksella on kaksi painevesireaktoria, joiden yksinkertaistettu toimintaperiaate on kuvassa 1. Lämmöntuotto tapahtuu reaktorissa, jossa ydinpolttoaine fissioituu. Reaktorin läpi kulkeva primääripiirin vesi lämpenee noin 300-asteiseksi ja kulkeutuu höyrystimille. Höyrystimillä osa lämmöstä siirtyy primääripiiriltä sekundääripiirille lämmönsiirtoputkien seinämien läpi. Primääripiirin vesi palautuu pääkiertopumppujen kautta reaktorille.

Höyrystimellä sekundääripiirin vesi höyrystyy ja kulkeutuu turbiinille. Turbiinilla korkeapaineisen höyryn lämpöenergia muuttuu mekaaniseksi energiaksi, jolla pyöritetään generaattorin roottoria. Generaattorilla mekaaninen energia muuttuu edelleen sähköenergiaksi. Generaattorin tuottama sähkö siirretään sähköverkkoa pitkin käyttäjille.



Kuva 1: Painevesireaktorin yksinkertaistettu toimintaperiaate (Fortum Keilaniemi, 2013)

Turbiinilta höyry siirtyy lauhduttimille. Lauhduttimilla vesihöyry lauhdutetaan takaisin vedeksi. Lauhduttimen jäähdytys tapahtuu merivedellä. Lauhdepumput siirtävät lauhdeveden lauhdevesisäiliöön, jolta vesi kulkeutuu esilämmittimien kautta takaisin höyrystimille.

## 2.2. Ydinturvallisuus

Ydinvoiman hajoamis- eli fissioreaktioissa syntyy radioaktiivisia nuklideita. Hajoamisreaktioissa syntyvät fissiotuotteet vapauttavat samanaikaisesti lämpöä.

Vaikka reaktori ajettaisiin alas, polttoaine kehittää edelleen jälkilämpöä. Vaaratilanne on mahdollinen, jos reaktorin lämmönsiirto häiriintyy.

Hätäjäähdytysjärjestelmien pettäminen lämmönsiirron häiriintyessä voi johtaa reaktorisydämen ylikuumentumiseen ja polttoaineen vaurioitumiseen. Seurauksena on radionuklidien vapautuminen jäähdytteeseen ja suojarakennukseen. Samanaikaisesti höyrynmuodostus voi nostaa suojarakennuksen painetta.

Radioaktiivisuutta pääsee ympäristöön, jos suojarakennuksen paineenalennusjärjestelmät, tiiveyden varmistusjärjestelmät ja suodatusjärjestelmät pettävät. Edellä kuvattu lämmönsiirron häiriintymisestä alkava kausaaliketju muodostaa ydinreaktorin onnettomuusriskin perussyyt.

Reaktoriturvallisuuden lähtökohtana on syvyysuuntainen turvallisuusajattelu (defence-in-depth), jonka mukaan onnettomuusketjun eteneminen pyritään katkaisemaan sen kaikissa vaiheissa. Syvyysuuntainen turvallisuusajattelu perustuu viiteen tasoon, jotka ovat (INSAG, 1996):

1. Häiriöiden ja vikaantumisten estäminen
2. Häiriöiden ja vikaantumisten hallinta ja havaitseminen
3. Suunnitteluperusteisten onnettomuuksien hallinta
4. Vakavien onnettomuuksien hallinta
5. Radioaktiivisten päästöjen vaikutusten minimointi.

Muita ydinvoimalaitoksilla noudatettavia periaatteita ovat ALARA<sup>2</sup> ja SAHARA<sup>3</sup>. ALARA on säteilysuojelun toimintaperiaate, jonka mukaan säteilyannokset ja säteilevien aineiden leviäminen minimoidaan mahdollisimman pieniksi sosiaaliset, tekniset ja taloudelliset näkökulmat huomioiden. SAHARA on ydinturvallisuusperiaate, joka tarkoittaa, että ydinvoimalaitokselle asetetut vaatimukset ovat ainoastaan vähimmäistavoite ja varsinainen tavoite on turvallisuuden maksimointi. (NEA, 2002)

Loviisan ydinvoimalaitoksen kolme tärkeintä turvatoimintoa, jotka takaavat ydinturvallisuuden ja joiden on toimittava kaikissa käyttötilanteissa, ovat:

- Reaktorin pysäytys ja ketjureaktion sammutus
- Jatkuvan jälkilämmönpoiston varmistaminen reaktorin sydäimestä ja sydämen ylikuumentumisen estäminen

---

<sup>2</sup> As Low As Reasonably Achievable

<sup>3</sup> Safety As High As Reasonably Achievable

- Suojarakennuksen tiiveyden ylläpito ja radioaktiivisten aineiden ympäristöön leviämisen estäminen.

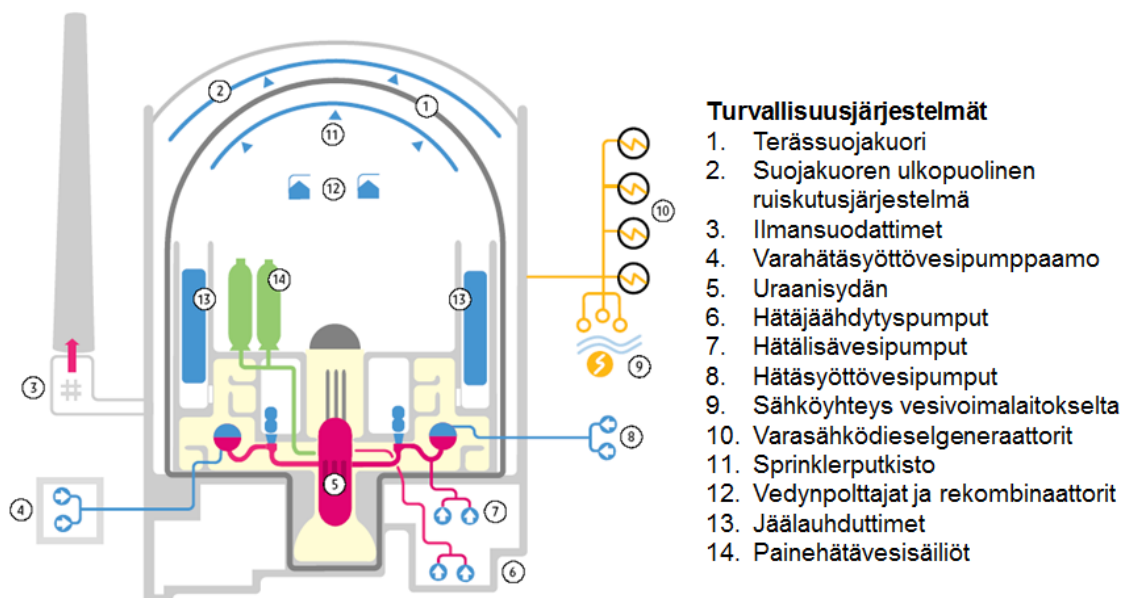
Vaatimusten varmistamiseksi voimalaitoksella on useita turvallisuusjärjestelmiä, jotka on suunniteltu varmennus- (redundanssi), erilaisuus- (diversiteetti) ja hajautusperiaatteen (segregaatio) mukaan. Redundanssi-periaatteen mukaan laitteen tai järjestelmän toiminta varmennetaan vähintään yhdellä samanlaisella laitteella tai järjestelmällä. Diversiteettiperiaate tarkoittaa, että sama turvallisuustehtävä voidaan hoitaa useilla erilaisilla mekanismeilla. Turvajärjestelmien sijainti on hajautettu fyysisesti eli segregoitu. (Fortum Power and Heat Oy, 2010)

### **2.3. Loviisan turvallisuusjärjestelmät**

Loviisan ydinvoimalaitoksen tärkeimmät turvallisuusjärjestelmät ovat kuvassa 2. Varsinainen reaktori ja uraanisydän on varustettu reaktorisuojausjärjestelmällä, jolla reaktorille voidaan suorittaa automaattinen pysäytys eli ns. pikasulku.

Hätälisävesijärjestelmällä voidaan kompensoida primäärijäähdytteen menetystä pienissä vuodoissa. Järjestelmän hätälisävesipumpuilla siirretään vettä hätälisävesisäiliöstä ja tarvittaessa varahätälisävesisäiliöstä primääripiirin kylmiin haaroihin.

Hätäjäähdytysjärjestelmän tehtävä on reaktorisydämen peittäminen vedellä suurissa jäähdytteenmenetysonnettomuuksissa, jotta polttoainesauvojen suojakuoren lämpötilat pysyvät sallituissa rajoissa. Primääripiirin paineen laskiessa alle n. 35 barin painehätävesisäiliöiden vesi purkautuu suoraan paineastiaan. Mikäli paine laskee edelleen alle 10 barin tasolle hätäjäähdytyspumput syöttävät vettä paineastiaan hätälisävesisäiliöstä tai suojarakennuksen lattiakaivoista.



Kuva 2: Loviisan ydinvoimalaitoksen pääturvallisuusjärjestelmät (Fortum Keilaniemi, 2013)

Loviisan kummallakin yksiköllä on jäälahduttimeen perustuva suojarakennus. Suojarakennus muodostuu sisemmästä kaasutiiviistä ja painetta kestävästä terässuojakuoresta sekä ulommasta betonisesta suojarakennuksesta, joka suojaa terässuojakuorta ja toimii säteilysuojana. Jäälahdutin on käytännössä passiivinen booriäävarasto. Suojarakennuksen ruiskutusjärjestelmällä (sprinkleriputkisto) voidaan onnettomuustilanteessa lauhduttaa suojarakennukseen vapautunutta höyryä. Vedynpolttajilla voidaan poistaa suojarakennukseen onnettomuustilanteessa muodostuvaa vetyä ja mahdolliset pienet vuodot johdetaan kontrolloidusti ulos ilmansuodattimien kautta.

Hätäsyöttövesijärjestelmän hätäsyöttövesipumpuilla turvataan riittävä syöttövesivirtaus höyrystimiin primääripiirin jäähdyttämiseksi kaikissa käyttötilanteissa. Primääripiirin jäähdytys on varmennettu varahätäsyöttövesijärjestelmällä.

Laitoksen omakäyttösähkö saadaan normaalisti omakäyttömuuntajista. Mikäli voimalaitoksen generaattorit joutuvat jännitteettömiksi saadaan tarvittava sähkönsyöttö valtakunnan 400 kilovoltin ja 110 kilovoltin verkoista. Lisäksi laitos on varustettu neljällä dieselgeneraattorilla, joista jokainen pystyy yksinään syöttämään laitokselle riittävän sähkötehon. Laitoksen ja Ahvenkosken vesivoimalaitoksen välillä on myös 20 kilovoltin sähköjohtoyhteys. (Fortum Power and Heat Oy, 2014)



## Luku 3

### Todennäköisyyspohjainen riskianalyysi

Termejä riski, vaara ja uhka käytetään yleensä puhekielessä toistensa synonyymeinä kuvaamaan epätoivottavaa tapahtumaa tai seurausta. Formaalisissa riskianalyysissä kuitenkin käsite *risk*i on tarkkaan määritelty ja ottaa huomioon sekä tapahtuman todennäköisyyden että seurauksen suuruuden. Riskin matemaattinen määritelmä on

$$R = \sum_i f_i c_i, \quad (1)$$

missä  $f_i$  on skenaarion  $i$  frekvenssi tai todennäköisyys ja  $c_i$  skenaarion  $i$  seuraus. Seuraus voidaan mitata esimerkiksi taloudellisena tappiona rahassa tai menetettyjen ihmishenkien määränä. (Modarres, 2006)

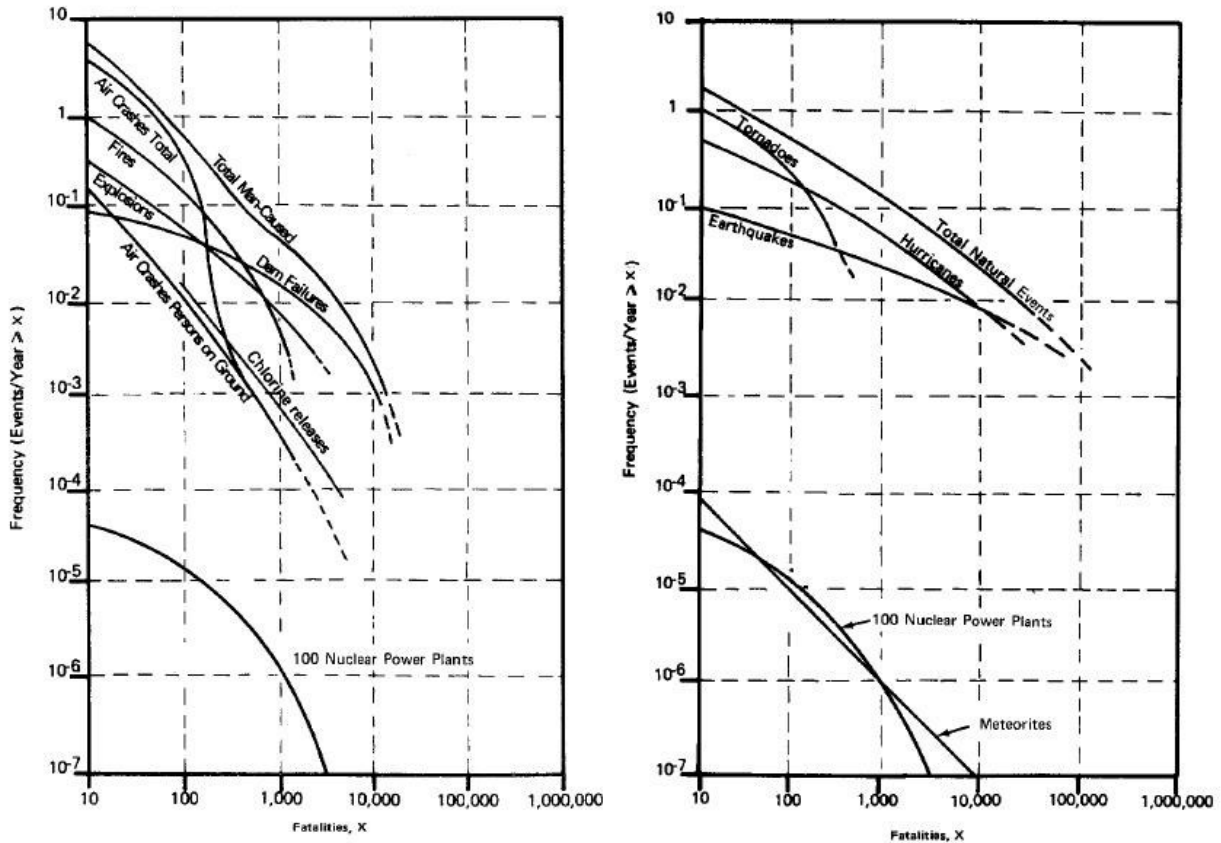
Todennäköisyyspohjainen riskianalyysi<sup>4</sup> (PRA) on systemaattinen lähestymistapa kompleksisten systeemien tutkimiseen. PRA:n tarkoitus on mallintaa järjestelmän komponenttien, ohjelmistojen ja ihmisten välistä vuorovaikutusta ja arvioida järjestelmän riskejä. PRA:n päätulos ei varsinaisesti ole laskettu kokonaisriskin lukuarvo tarkasteltavalle systeemille. Sen sijaan tarkoituksena on löytää järjestelmän riskiä merkittävästi nostavat elementit, arvioida analyysien ja estimaattien epävarmuuksia sekä selvittää erilaisten riskivähennysstrategioiden tehokkuutta.

PRA:n historian alkuketkinä voidaan pitää vuotta 1975, jolloin ensimmäinen kattava ydinvoimalaitosten todennäköisyyspohjainen riskitutkimus valmistui yhdysvalloissa. Tutkimus kantoi nimeä WASH-1400 ("The Reactor Safety Study") ja laadittiin professori Norman Rasmussenin johdolla Yhdysvaltain ydinturvallisuusviranomaiselle. (NRC, 1975)

---

<sup>4</sup> Käytetään myös termiä todennäköisyyspohjainen turvallisuusanalyysi (PSA)

Tutkimuksessa hyödynnettiin tapahtumapu- ja vikapuumalleja ydinvoimalaitosten riskien arvioinnissa. Raportin johtopäätösten mukaan ydinvoiman riskit ovat pieniä verrattuna muihin väestöön kohdistuviin riskeihin. Kuvassa 3 on esitetty kaksi raportin kuvaajaa, joissa on verrattu ydinvoiman käytön riskejä esim. tulipaloista, patomurtumista ja poikkeuksellisista luonnonilmiöistä muodostuviin riskeihin. Nykyään PRA:lla on useita sovelluskohteita ydinvoiman ja energiantuotannon lisäksi mm. lentoliikenteessä, prosessiteollisuudessa ja avaruushjelmissä.



**Kuva 3: Sadan ydinvoimalaitoksen kokonaisriski verrattuna muihin väestöön kohdistuviin riskeihin WASH-1400-raportin mukaan (NRC, 1975)**

Suomessa Loviisan voimalaitoksella ensimmäinen todennäköisyyspohjainen eli probabilistinen riskianalyysi valmistui vuonna 1989. Ennen PRA:n yleistymistä ydinvoimalaitosten turvallisuusanalyysit perustuivat *deterministisiin* tarkasteluihin. Deterministisen analyysin vaatimuksen mukaan oletetut skenaariot eivät saa johtaa epätoivottuihin seurauksiin, kun taas probabilistinen vaatimus on riittävän pieni todennäköisyys epätoivotulle seuraukselle. Deterministisessä analyysissä pyritään tunnistamaan suunnitteluperusteisia onnettomuusketjuja ja onnettomuusketju katkaistaan syvyysuuntaisen puolustuksen periaatteiden mukaisesti. Nykyään deterministiset ja todennäköisyyspohjaiset analyysit tukevat ja täydentävät toisiaan.

PRA jaetaan kolmeen tasoon, jotka ovat:

- Ensimmäinen taso määrittää ydinpolttoaineen vaurioitumiseen johtavat onnettomuusketjut ja arvioi niiden todennäköisyydet
- Toinen taso arvioi ydinvoimalaitoksesta vuotavien radioaktiivisten aineiden päästön määrän, todennäköisyyden ja ajoittumisen
- Kolmas taso arvioi radioaktiivisten aineiden päästön aiheuttaman riskin ihmisille ja ympäristölle.

Suomessa vaaditaan tason 1 ja tason 2 todennäköisyyspohjaista riskianalyysiä. Säteilyturvakeskuksen (STUK) tehtävänä on ydinenergialain (990/1987) 7 r § mukaan asettaa ydinenergialain mukaisen turvallisuustason toteuttamista koskevat yksityiskohtaiset turvallisuusvaatimukset. Säteilyturvakeskus valvoo osana muuta ydinturvallisuuteen liittyvää riskien hallintaa PRA:n toteuttamista. PRA:n toteuttaminen ohjeistetaan ydinvoimalaitosohjeissa (YVL-ohjeet). (Säteilyturvakeskus, 2013) YVL-ohjeiden mukaan PRA:ssa:

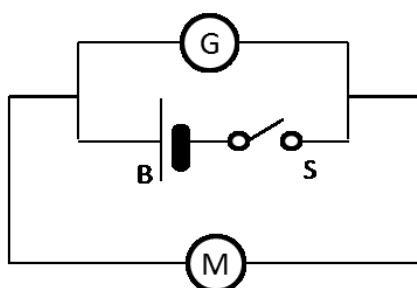
- Tasolla 1 ydinvoimalaitosyksikkö on suunniteltava siten, että reaktorisydämen vaurioitumisen taajuuden odotusarvo on alle  $10^{-5} \text{ a}^{-1}$
- Tasolla 2 ydinvoimalaitosyksikkö on suunniteltava valtioneuvoston asetuksen (717/2013) 10 §:ssä esitettyjen periaatteiden mukaisesti siten, että sellaisen laitoksesta onnettomuustilanteessa vuotavien radioaktiivisten aineiden päästön, jonka ulkoilmaan vapautuva Cs-137-päästö ylittää 100 TBq, taajuuden odotusarvo on pienempi kuin  $5 \cdot 10^{-7} \text{ a}^{-1}$  ja sellaisten onnettomuusketjujen, joissa vakavan onnettomuuden aikaisessa vaiheessa suojarakennustoiminto epäonnistuu tai menetetään, osuuden reaktorin sydämen vaurioitumisen taajuudesta on oltava pieni.

Tulevaisuudessa Loviisan ydinvoimalaitoksella on tarkoitus tehdä myös tason 3 analyysyjä.

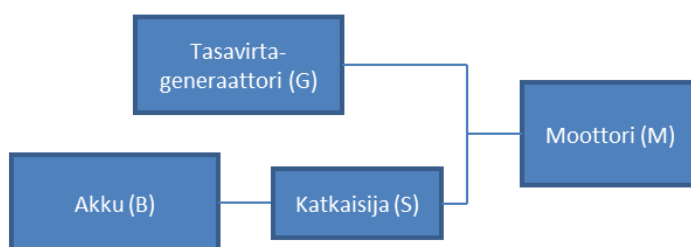
### 3.1. Luotettavuusmallit

Järjestelmien luotettavuuden arvioimiseksi on kehitetty erilaisia luotettavuusmalleja, joista PRA:ssa yleisimmin käytettyjä ovat vika- ja tapahtumapuut sekä luotettavuuslohkokaaviot. Tutkitaan näitä luotettavuusmalleja tarkemmin yksinkertaistetun moottorin sähkösyöttöjärjestelmän avulla. Järjestelmän piirikaavio ja luotettavuuslohkokaavio ovat kuvassa 4.

Piirikaavio:



Luotettavuuslohkokaavio:



**Kuva 4: Moottorin sähkönsyöttöjärjestelmän piirikaavio ja luotettavuuslohkokaavio**

Järjestelmässä sähkömoottori M saa normaalisti sähkönsyöttönsä tasavirtageneraattorilta G. Mikäli normaali sähkönsyöttö häiriintyy, voidaan käyttää varalla olevaa akkua B, jota ohjataan katkaisijalla S.

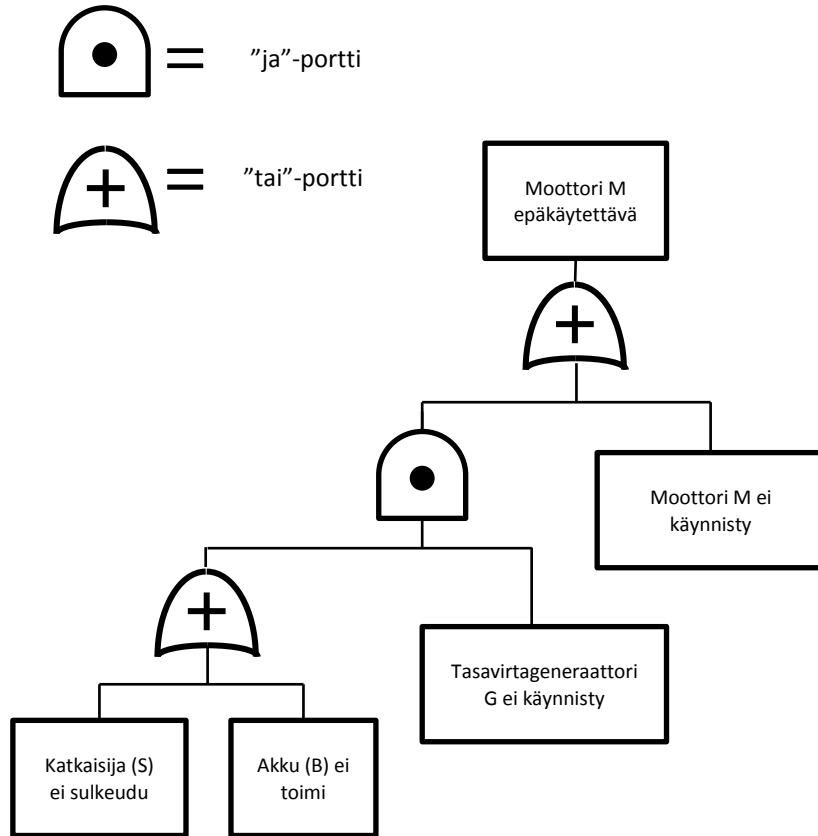
Kuvan 4 luotettavuuslohkokaavion avulla kuvataan järjestelmän toimintaa yleisellä tasolla. Lohkokaaviossa järjestelmän komponentit esitetään lohkoina ja lohkojen väliset riippuvuudet viivojen avulla. Järjestelmä toimii, jos luotettavuuslohkokaaviossa on yksikin alusta loppuun ulottuva polku, jossa kaikki komponentit toimivat. Kuvan 4 tapauksessa tällaisia polkuja voivat olla polut G, M sekä B, S, M.

Tapahtumapuun on horisontaalisesti rakennettu järjestelmän luotettavuusmalli, joka alkaa vasemmalle merkatusta järjestelmän alkutapahtumasta. Tarkasteltavan sähkönsyöttöjärjestelmän tapauksessa alkutapahtuma on moottorin M käyttötarve, jota merkitään A:lla. Alkutapahtuman jälkeen järjestelmän osat mallinnetaan tapahtumina vasemmalta oikealle kronologisessa järjestyksessä. Tapahtumapuun haaroissa siirtyminen ylöspäin tarkoittaa tapahtuman onnistumista ja siirtyminen alaspäin epäonnistumista. Moottorin sähkönsyöttöjärjestelmän tapahtumapuun on kuvassa 5. Tapahtumapuusta nähdään järjestelmän onnistumiseen (+) tai epäonnistumiseen (-) johtavat ketjut.

Moottorin käyttötarve (A)	Generaattorin G käynnistyminen	Akun B toiminta	Katkaisijan S sulkeutuminen	Moottorin M käynnistyminen	Tapahtumaketju	Lopputulos
					AGM	+
					AGM $\bar{M}$	-
					A $\bar{G}$ BBSM	+
					A $\bar{G}$ B $\bar{S}$ M	-
					A $\bar{G}$ B $\bar{S}$	-
					A $\bar{G}$ B	-

**Kuva 5: Moottorin sähkönsyöttöjärjestelmän tapahtumapuu**

Vikapuu on PRA:ssa yleisesti käytetty luotettavuusmalli, joka on myös Loviisan ydinvoimalaitoksen PRA:n lähtökohta. Vikapuun rakentamisessa lähdetään liikkeelle huipputapahtumasta, joka on jokin ei-toivottu tapahtuma. Loviisan ydinvoimalaitoksen tason 1 PRA:ssa huipputapahtuma on reaktorisydämen vaurio ja esimerkin sähkönsyöttöjärjestelmän tapauksessa ”moottori M epäkäytettävä”. Huipputapahtuman muotoilemisen jälkeen määritellään kaikki komponenttien vikaantumiset, jotka voivat johtaa huipputapahtumaan ja tunnistetaan niiden väliset riippuvuudet. Vikapuussa tapahtumien väliset riippuvuudet mallinnetaan loogisten ”ja”- sekä ”tai”-porttien avulla. Esimerkin moottorin sähkönsyöttöjärjestelmän vikapuu on kuvassa 6.



Kuva 6: Moottorin sähkönsyöttöjärjestelmän vikapuun

Vikapuun rakentamisen jälkeen halutaan määrittää erilaiset järjestelmän komponenttien vikaantumisten yhdistelmät, jotka johtavat huipputapahtumaan (kvalitatiivinen analyysi) sekä laskea huipputapahtuman todennäköisyys (kvantitatiivinen analyysi).

Vikapuiden laskenta onnistuu Boolean algebran avulla. Vikapuun "tai"-portteja vastaa Boolean algebrassa binäärimuuttujien summa sekä "ja"-portteja binäärimuuttujien tulo. Kun vikapuun kirjoitetaan auki Boolean algebran avulla, saadaan järjestelmän rakennefunktio. Merkataan sähkönsyöttöjärjestelmän huipputapahtumaa "moottori M epäkäytettävä"  $T$ :llä. Sähkönsyöttöjärjestelmän tapauksessa rakennefunktioksi saadaan

$$T = ((S + B) * G) + M, \quad (2)$$

joka sievenee muotoon

$$T = GS + BG + M. \quad (3)$$

Huipputapahtumaan johtavia komponenttien yhtäaikaisia vikaantumisia kutsutaan katkosjoukoiksi. Rakennefunktion lauseke antaa kolme katkosjoukkoa, jotka ovat kaikki myös minimikatkosjoukkoja. Minimikatkosjoukko tarkoittaa sellaista tapahtumien yhdistelmää, joka johtaa

huipputapahtumaan, mutta josta ei voida poistaa ainuttakaan tapahtumaan ilman, että kyseessä olisi katkosjoukko.

Järjestelmän vikaantumistodennäköisyys eli huipputapahtuman todennäköisyys saadaan minimikatkosjoukkojen avulla. Huipputapahtuman todennäköisyys on minimikatkosjoukkojen unioni:

$$P(T) = P\left(\bigcup_i MKJ_i\right), \quad (4)$$

Laskentaa varten voidaan tehdä ensimmäisen asteen approksimointi

$$P_1(T) \approx \sum_i P(MKJ_i) \quad (5)$$

ja toisen asteen

$$P_2(T) \approx \sum_i P(MKJ_i) - \sum_{i_1 < i_2} P(MKJ_{i_1} * MKJ_{i_2}). \quad (6)$$

Approksimaatioiden avulla saadaan ala- ja yläraja vikaantumistodennäköisyydelle

$$P_1(T) - P_2(T) \leq P(T) \leq P_1(T). \quad (7)$$

(Modarres, 2006)

### 3.2. Tärkeysmitat

Riskianalyysin tärkeimpiä tuloksia on merkittävimpien riskitekijöiden identifiointi. Kun järjestelmän merkittävimmät riskitekijät ovat tiedossa, voidaan riskiä vähentävät toimenpiteet kohdistaa tekijöihin, joiden avulla saavutetaan suurin riskin pienennys. Arviointiin käytetään erilaisia tärkeysmittoja, joita voidaan hyödyntää useilla osa-alueilla (Borgonovo & Apostolakis, 2001):

- Suunnittelu: tukea järjestelmän suunnittelua lisäämällä tai poistamalla komponentteja, alijärjestelmiä, toimintamalleja jne.
- Testaus ja kunnossapito: arvioida erilaisia järjestelmän testaus- ja kunnossapitomalleja
- Konfigurointi ja hallinta: mitata komponenttien vikaantumisten ja epäkäytävyyksien vaikutusta

PRA:n tarpeisiin on kehitetty useita erilaisia tärkeysmittoja (van der Borst & Schoonakker, 2001), joista Loviisan riskianalyysissä yleisesti käytettyjä ovat

Fussell-Vesely (FV), Risk Increase Factor<sup>5</sup> (RIF) ja Risk Decrease Factor<sup>6</sup> (RDF).

Fussell-Vesely kertoo mikä tapahtuman  $x_i$  osuus on koko laitoksen riskitasosta, toisin sanoen tapahtuman  $x_i$  sisältämien minimikatkosjoukkojen suhde kaikkien minimikatkosjoukkojen summaan. Fussell-Vesely-tärkeysmita voidaan ilmaista kaavalla

$$FV = \frac{R_n - R(x_i = 0)}{R_n}, \quad (8)$$

missä  $R_n$  on laitoksen normaali riskitaso ja  $R(x_i = 0)$  laitoksen riskitaso, kun tapahtuma  $x_i$  oletetaan mahdottomaksi.

RIF ja RDF ovat samantyyppisiä tärkeysmittoja. RIF kuvaa laitoksen riskitason nousua, kun tapahtuma  $x_i$  oletetaan varmasti tapahtuvaksi ja RDF riskitason laskua, kun tapahtuma  $x_i$  oletetaan mahdottomaksi. RIF muotoillaan

$$RIF = \frac{R(x_i = 1)}{R_n}, \quad (9)$$

missä  $R(x_i = 1)$  on laitoksen riskitaso tapahtuman  $x_i$  ollessa varmasti tosi. RDF ilmaistaan

$$RDF = \frac{R_n}{R(x_i = 0)}. \quad (10)$$

Kaavoista (2) ja (3) huomataan, että Fussell-Vesely ja RDF liittyvät toisiinsa relaatiolla

$$FV = \frac{R_n - R(x_i = 0)}{R_n} = 1 - \frac{R(x_i = 0)}{R_n} = 1 - \frac{1}{RDF}. \quad (11)$$

### 3.3. Loviisan PRA-malli

Loviisan ydinvoimalaitoksen todennäköisyyspohjaisen riskianalyysin historia ulottuu 1980-luvun puoliväliin asti. Vuonna 1984 Säteilyturvakeskus esitti laajennetun tason 1 riskiselvityksen tekemistä, joka kattaisi sydämen sulamisriskin ja suojarakennuksen ohitusketjut. Samana vuonna STUK kehotti tason 2 liittämistä riskiselvitykseen. PRA:n laatiminen alkoi seuraavana vuonna 1985.

---

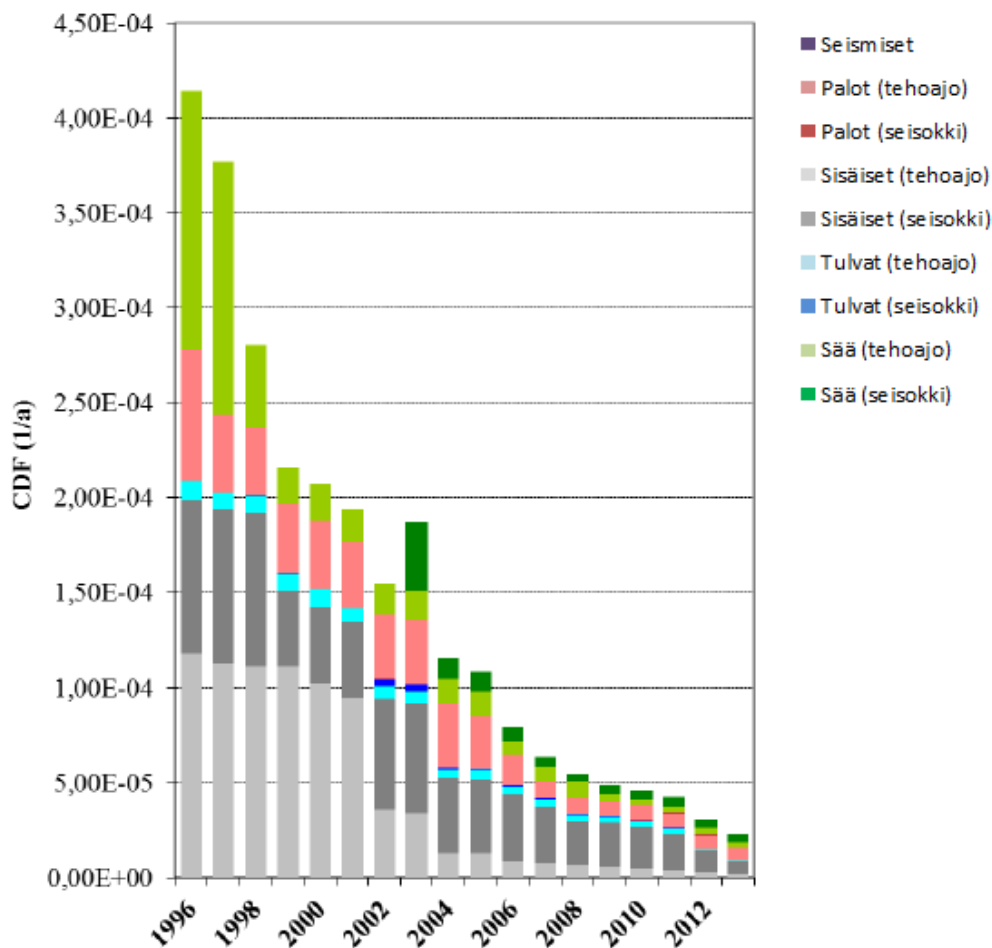
<sup>5</sup> Käytetään myös termiä Risk Achievement Worth (RAW) ja

<sup>6</sup> Risk Reduction Worth (RRW)



Ensimmäinen PRA-pääraportti valmistui vuonna 1989. Samaan aikaan ulkoisten tekijöiden kuten palo-, tulva- ja sään riskien selvitys eteni. Laitoksen seisminen PRA valmistui vuonna 1992, tulva- ja sää-PRA vuonna 1994 sekä palo-PRA vuonna 1997. Yhdeksänkymmentäluvun lopulla riskitutkimus laajeni laitoksen seisokkitiloihin. (Jänkälä, 2014)

Nykyisin PRA on vakiinnuttanut asemansa Loviisan laitoksen turvallisuuden ylläpidossa. PRA kattaa nykyään molemmat laitostyöyksiköt ja riskitarkastelut päivitetään vuosittain. Todennäköisyyspohjainen riskianalyysi on tukenut laitoksen käyttöä ja suunnittelua sen alkuhetkiltä lähtien ja laitoksen sydänvauriotaajuus on jatkuvasti pienentynyt, mikä havaitaan kuvasta 7.

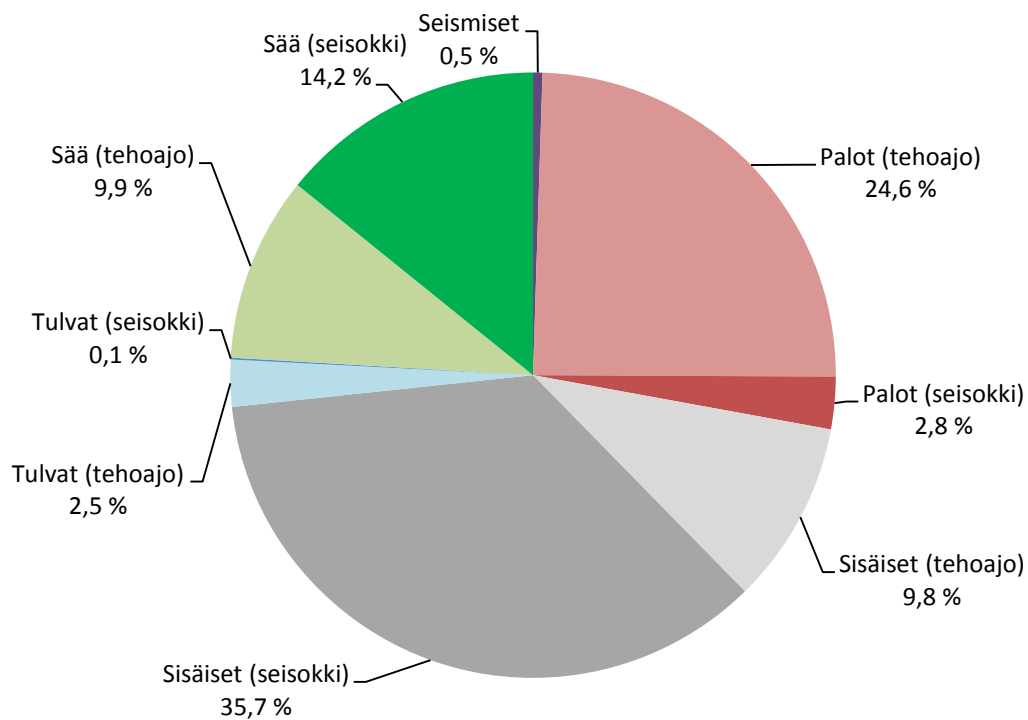


**Kuva 7: Loviisa 1-laitosyksikön sydänvauriotaajuuden (CDF) kehittyminen vuosina 1996-2013 (Jänkälä, 2014)**

Loviisa 1-laitosyksikön sydänvauriotaajuus on nykyään  $2,4 \cdot 10^{-5} \text{ a}^{-1}$ . PRA:n yleisten periaatteiden mukaisesti laitoksen riskimallissa huomioidut tapahtumat jakautuvat perus- ja alkutapahtumiin. Alkutapahtumat ovat tapahtumia, jotka toteutuessaan edellyttävät turvallisuustoimintoja, jotta tapahtuman seurauksena

ei olisi huipputapahtuma eli sydänvaurio. Perustapahtumat kuvaavat alkutapahtuman sattuessa vaadittavissa turvallisuustoiminnoissa tarvittavien laitteiden vikaantumisia tai muita tapahtumia, jotka estävät turvallisuustoiminnan toteutumisen yksin tai yhdessä muiden perustapahtumien kanssa. Loviisan PRA-mallissa on tunnistettu yli 500 alkutapahtumaa ja yli 7000 perustapahtumaa.

Kuvassa 8 on esitetty, miten laitoksen sydänvauriotaajuuteen vaikuttavien alkutapahtumien osuudet jakautuvat. Merkittävimmät riskitekijät muodostuvat seisokin aikaisista sisäisistä tapahtumista ja tehoajon palotapahtumista.



**Kuva 8: Loviisa 1-laitosyksikön riskitekijöiden jakautuminen vuoden 2012 vuosihuollon jälkeisessä konfiguraatiossa (Jänkälä, et al., 2013)**

## **Luku 4**

### **Ajasta riippuvat tekijät**

Diplomityöhön valitut tapahtumat, joiden tehoajon aikariippuvuus huomioidaan, jakautuvat kahteen kategoriaan. Ensimmäiseen kategoriaan kuuluvat perustapahtumat, joiden aikariippuvuus syntyy koestuskierrosta ja sen pituudesta. Toiseen kategoriaan kuuluvat perus- ja alkutapahtumat, joiden aikariippuvuus vaihtelee vuoden- tai vuorokaudenajan mukaan. Vuodenajan mukaan vaihtelevia tapahtumia ovat esimerkiksi sääilmiöt ja vuorokaudenajan mukaan vaihtelevia mm. laitoksen työvuorot. Lisäksi vuosihuollon aikainen ajasta riippuva sydänvauriotaajuus käsitellään lyhyesti.

#### **4.1. Yksittäisviat**

Ydinvoimalaitos rakentuu erittäin suuresta määrästä erilaisia laitteita ja komponentteja. Osa laitteista on jatkuvassa käytössä, kuten primääripiirin pääkiertopumput. Useat turvallisuusjärjestelmät ja niiden komponentit ovat kuitenkin varalla ja niitä käytetään vain tarpeen tullessa. Kyseisten laitteiden toimintavarmuudesta huolehditaan koestuskierroilla. Esimerkiksi venttiilit ajetaan auki ja kiinni sekä pumput ja dieselgeneraattorit käynnistetään. (Martorell, et al., 1999) (Sim, 1987)

Diplomityöhön on valittu tarkasteltavaksi ainoastaan edellä mainittuja Loviisan ydinvoimalaitoksen normaalikäytön aikana varalla olevia laitteita, joiden toimintavarmuudesta huolehditaan koestuskierroilla. Tällöin laitteiden epäkäytettävyys noudattaa mallia, jossa testauksen eli koestuksen jälkeen laitteen epäkäytettävyys on minimissään. Koestuksen jälkeen epäkäytettävyys kasvaa aina seuraavaan koestukseen asti ja saavuttaa maksiminsa. Koestuksen jälkeen epäkäytettävyys laskee jälleen miniminsä.

Laitoksella sijaitsevat laitteet identifioidaan kz-tunnuksilla, jotka kertovat laitoksen käyttöpaikan. Kz-tunnus sisältää tiedon laitoksesta, laitteen redundanttisuudesta ja järjestelmästä. Jos laite on redundanttinen, sen toiminta on varmennettu vähintään yhdellä samanlaisella laitteella. Toisilleen redundanttisen laitteiden toiminnan täytyy olla toisistaan riippumatonta. Lisäksi kz-tunnuksesta selviää laitteen prosessiosa, laitekoodi ja juokseva numero. (Kelavirta, 2011)

Tarkasteluun on otettu erilaisia voimalaitoksen laitetyppejä, joita ovat (suluissa kz-merkintäjärjestelmän mukainen tunnus):

- Dieselgeneraattorit (G)
- Katkaisijat (Q)
- Puhaltimet (D)
- Pumput (D)
- Termostaatit (T)
- Venttiilit (S).

Osa laitetyppeistä jakautuu edelleen alakategorioihin, esimerkiksi venttiileihin kuuluu magneetti-, moottori-, säätö-, varo- ja takaiskuventtiileitä. Varoventtiileistä ei huomioida tuorehöyryputkiston RA13S001/2-venttiileitä pienen riskimerkityksen takia, mutta paineentasausjärjestelmän varoventtiili YP12S001 on mukana tarkastelussa korkean riskimerkityksen vuoksi. Laitteiden vikaantumistavoista on huomioitu

- Automaation epäonnistuminen (dieselgeneraattorit)
- Epäonnistunut avautuminen ja sulkeutuminen (katkaisijat, venttiilit)
- Epäonnistunut käynnistyminen (puhaltimet, pumput, dieselgeneraattorit)
- Epäonnistunut mittaus (termostaatit).

Laitteita on kerätty yhteensä 23:sta eri Loviisan voimalaitoksen järjestelmästä, jotka ovat (nimien perässä Loviisan kz-merkintäjärjestelmän mukainen järjestelmätunnus):

- Omakäyttökeskukset (BA, BB, BC, BD)
- Dieselkeskukset (BU, BV, BW, BX)
- Dieselgeneraattorit (EY)
- Tuorehöyryputkisto (RA)

- Syöttövesipiiri (RL)
- Primääripiirin seisonajäähdytys (RR)
- Laitoslisäveden syöttö (RV)
- Kemikaalien syöttö (TB)
- Primääriveden puhdistus (TC)
- Boorivesien käsittelylaitos (TD)
- Reaktorivälijäähdytyspiiri (TF)
- Polttoainealtaiden jäähdytys (TG)
- Hätäjäähdytysjärjestelmä (TH)
- Hätälisävesijärjestelmä (TJ)
- Normaali lisävesijärjestelmä ja vuotojen keruu (TK)
- Valvottujen alueiden ilmastointi (TL)
- Sprinklerijärjestelmä (TQ)
- Ilmastointi (UV,UW)
- Merivesipiiri (VC)
- Sivumerivesipiiri (VF)
- Turbiinivälijäähdytyspiiri (VG)
- Pääkiertopumput (YD)
- Paineentasausrjärjestelmä (YP).

Laitteiden koestuskierrot määrätään turvallisuusteknisissä käyttöehdoissa. Koestuskierrot vaihtelevat tarkasteluun valittujen laitteiden kohdalla viikosta kahteen vuoteen. Laitteiden valinnassa on käytetty pohjana Loviisan turvallisuusteknisten käyttöehtojen riskitietoista tarkastelua (Sirén, 2013). Laitteiden määrää on karsittu edelleen niiden riskimerkityksen mukaan. Laitteita, joiden riskimerkitys on pieni, ei ole otettu huomioon tarkastelussa. Tätä periaatetta on sovellettu siten, että laitteet, joiden Fussell-Vesely tärkeysmitan arvo on alle  $10^{-7}$ , on jätetty tarkastelun ulkopuolelle. Näillä reunaehdoilla työhön on valittu yhteensä 275 yksittäisvian perustapahtumaa.

## 4.2. Yhteisvialat

Yksittäisvikojen lisäksi tarkasteluun otettiin muutamia yhteisvikoja. Yhteisvialla tarkoitetaan vähintään kahden laitteen vikaantumista samasta syystä lyhyen ajan sisällä, jolloin vikaantumiset eivät ole toisistaan riippumattomia. Yhteisvikoja voivat aiheuttaa esimerkiksi laitteiden valmistus-, suunnittelu-, ja kunnossapitovirheet sekä ikääntyminen. (Laitonen, 2010)

Loviisan PRA:ssa rinnakkaisten laitteiden kohdalla on huomioitu yhteisvikojen eri kertaluvut  $k$ . Esimerkiksi neljän hätädieselgeneraattorin osalta on huomioitu mahdollisuus, että kaksi, kolme tai neljä ( $k = 2,3,4$ ) generaattoria vikaantuu yhteisvian johdosta. Näin ollen esimerkiksi kahden eri generaattorin yhteisvikakombinaatioita on kuusi kappaletta, kolmen neljä kappaletta ja neljän yksi.

Diplomityöhön on otettu vain täydellisiä yhteisvikoja eli tapauksia, joissa jokainen rinnakkainen laite vikaantuu. Valinta on tehty riskiperusteisesti sekä laskentaohjelmiston rajoitteiden takia. Täydellisten yhteisvikojen riskimerkitys on suurempi verrattuna alempien kertalukujen yhteisvikojen riskimerkitykseen.

Yhteisvialat koskevat samoja järjestelmiä sekä laite- ja vikaantumistyyppejä kuin edellisessä kappaleessa käsiteltyjen yksittäisvikojen kohdalla. Yhteisvikoja on tarkastelussa yhteensä 19 kappaletta.

## 4.3. Vuodenaikariippuvuudet

Komponenttien vikaantumisista johtuvien yksittäisvikojen ja yhteisvikojen lisäksi diplomityöhön valittiin muutamia vuodenaikariippuvia tapahtumia, joista kahdeksan on perustapahtumia ja neljätoista alkutapahtumia. Valitut perustapahtumat ovat taulukossa 1.

Perustapahtuma ALGAE kuvaa todennäköisyyttä levän esiintymiselle laitoksen jäähdytysvedessä, mikä voi johtaa koriketjusuodattimien tukkeutumiseen. FIRESW kuvaa ilmastointilaitteiden UV25B02/3 käymisen aikaosuutta, mikä vaihtelee kesä- ja talviajan mukaan.

Neljä seuraavaa tapahtumaa (SEALE<-05, SEALEV<-02, SEALEV>+1 ja SEALEV>-02) kuvaavat meriveden pinnankorkeuden todennäköisyyksiä, joilla on vaikutusta merivesipiirin ja sivumerivesipiirin toimintaan. Kaksi viimeistä (SUMMERTIME ja WINTERTIME) jakavat laitoksen toiminnan kesäaikaan ja talviaikaan. Kesä- ja talviaikaan laitoksen ilmastointijärjestelmiä käytetään eri tavalla, mikä on huomioitu PRA-mallissa.

**Taulukko 1: Tarkastellut vuodenaika- ja vuorokaudenaikariippuvat perustapahtumat**

Tunnus	Kuvaus
ALGAE	Levää meressä
FIRESW	Ilmastointilaitteen UV25B03 käyminen
SEALE<-05	Meriveden pinta alle -0,5 metriä
SEALEV<-02	Meriveden pinta alle -0,2 metriä
SEALEV>+1	Meriveden pinta yli 1,0 metriä
SEALEV>-02	Meriveden pinta -0,2 metrin ja +1.0 metrin välillä
SUMMERTIME	Kesäaika
WINTERTIME	Talviaika

Taulukossa 2 ovat vuodenaikariippuvat alkutapahtumat, jotka on otettu mukaan tarkasteluun. Levän esiintyminen on huomioitu Loviisan PRA-mallissa myös alkutapahtumana (IALGAE). Suppo (IFRICE) tarkoittaa alijäähtyneessä vedessä pakkasella voimakkaan tuulen takia muodostuneita jääkiteitä, jotka voivat laitoksella tukkia karkeavälpät, hienovälpät ja ketjukorisuodattimet. Salamointi (ILIGHTA) voi aiheuttaa sekä laitteiden vikaantumisia että tulipaloja. PRA-mallissa on huomioitu erikseen voimakas salamointi (ILIGHTB).

Öljyonnettomuus Suomenlahdella (IOILSLICK) voi johtaa öljyn etenemiseen laitoksen lähivesille ja aiheuttaa edelleen koriketjusuodattimien, TF-lämmönvaihtimien ja dieselgeneraattorien jäähdytysveden lämmönvaihtimien tukkeutumisen.

**Taulukko 2: Tarkastellut vuodenaikariippuvat alkutapahtumat, yksittäisestä luonnonilmiöstä johtuvat alkutapahtumat merkattu vaaleanvihreällä ja kahta tai useampaa samanaikaista luonnonilmiötä kuvaavat alkutapahtumat tummanvihreällä**

Tunnus	Kuvaus
IALGAE	Levää meressä
IFRICE	Suppo
ILIGHTA	Salamointi
ILIGHTB	Voimakas salamointi
IOILSLICK	Öljypäästö merellä
ISEAL2	Meriveden pinta yli 2,0 metriä
ISEAL25	Meriveden pinta yli 2,5 metriä
ISEAL3	Meriveden pinta yli 3,0 metriä
IWIND45	Voimakas tuuli (>45 m/s)
IALSNW39	Levää, lumimyrsky ja voimakas tuuli (>39 m/s)
IALW39	Levää ja voimakas tuuli (>39 m/s)
IFRSNW39	Suppo, lumimyrsky ja voimakas tuuli (>39 m/s)
IFRW39	Suppo ja voimakas tuuli (>39 m/s)
ISNW39	Lumimyrsky ja voimakas tuuli (>39 m/s)

Poikkeuksellisen korkea merivesi voi johtaa veden tulvimiseen laitoksella aiheuttaen erinäisiä ongelmia. Korkea merivesi jakautuu kolmeen eri alkutapahtumaan (ISEAL2, ISEAL25 ja ISEAL3) vedenkorkeuden ja laitostilanteen mukaan. Alkutapahtuma ISEAL2 vaatii Loviisa 2-laitosyksikön kylmäseisokin, jolloin merivesiputkisto on avattu huoltoa varten. Alkutapahtuma ISEAL25 vaatii sopivasta suunnasta puhaltavan tuulen ja korkean aallokon.

Erittäin voimakas tuuli voi aiheuttaa alkutapahtuman (IWIND45), jossa laitosalueen rakenteita rikkoutuu. Taulukon 2 viisi viimeistä alkutapahtumaa (IALSNW39, IALW39, IFRSNW39, IFRW39 ja ISNW39) ovat yhdistelmiä kahdesta tai kolmesta luonnonilmiöstä ja niiden samanaikaisesta tapahtumisesta. Näissä tapahtumissa on osallisena kaikissa tapauksissa voimakas yli 39 metriä sekunnissa puhaltava tuuli, joka voi aiheuttaa ulkoisen sähköverkon menetyksen. Muut ilmiöt ovat joko levä, suppo ja lumimyrsky.

#### **4.4. Koestuksen aikainen epäkäytettävyys**

Koestuskierto vaikuttaa laitteiden epäkäytettävyysiin kappaleen 4.1 mukaisesti, mutta pelkkä koestus itsessään aiheuttaa myös epäkäytettävyttä. Osa laitteista ei ole käytettävissä koestuksen aikana. Täten epäkäytettävyttä muodostuu koestuksen aikaosuuden mukaan. PRA-mallissa koestuksista aiheutuvia epäkäytettävyksiä on huomioitu erillisinä perustapahtumina, jotka merkitään loppupääteellä ”MM”.

Perustapahtumilla JV20S003MM ja JV60S003MM on suuri riskimerkitys Loviisan PRA-mallissa. Kummankin perustapahtuman Fussell-Vesely tärkeysmitan arvo on noin kaksi prosenttia, mikä tarkoittaa merkittävää osuutta kokonaisriskistä. Perustapahtumat kuvaavat koestuksia, joissa eristysventtiilit TQ/TH/TJ20S003 tai TQ/TH/TJ60S003 ovat samanaikaisesti kiinni.

Molemmat koestuskierrot ovat pituudeltaan kaksi viikkoa siten, että kolme ensimmäistä koestusta ovat lyhyitä (keskimäärin 52,5 minuuttia) ja neljäs pidempi (keskimäärin 150 minuuttia). Pidemmissä koestuksissa linjan pumpuille tehdään kunnonvalvontamittaukset. Koestukset on keskenään porrastettu yhdellä viikolla.

#### **4.5. Päivä-, ilta- ja yövuoron vaikutus**

Loviisan ydinvoimalaitoksella on päivävuoron aikaan enemmän ihmisiä töissä kuin ilta- ja yövuorossa. PRA-mallissa on oletettu, että riskitaso on matalampi



päiväsaikaan, koska suurempi henkilöstömäärä helpottaa turvallisuus-toimintojen toteuttamista mahdollisessa poikkeustilanteessa.

Päivävuoroa kuvaa perustapahtuma DAYSHIFT ja ilta- ja yövuoroa perustapahtuma NIGHTSHIFT. Päivävuoron pituus on kahdeksan tuntia sekä ilta- ja yövuoron 16 tuntia vuorokaudesta riippumatta. Oletetaan päivävuoron osuvan aikavälille 8-16, jolloin muu aika on ilta- ja yövuoroa.

#### 4.6. Vuosihuollon aikainen riski

Normaali tehoajo kattaa Loviisan laitoksella vuodesta noin 90 prosenttia. Kesäaikaan osuva vuosihuolto jakautuu seisokkitiloihin, jotka määritetään turvallisuusteknisissä käyttöehdoissa. Loviisan riskitutkimuksessa tehoajo ja seisokkitilat jaetaan edelleen osatiloihin, joissa tehoajoa merkataan tunnuksella P ja seisokkitiloja tunnuksilla B-Q. Seisokkitilojen kuvaukset ovat seuraavat:

Käynnistystila:

- **B** Toimenpiteet pienellä teholla ja reaktorin alikriittisyysajo

Kuumavalmius:

- **C** Primääripiirin paineen lasku ja jäähdytys lämpötilaan 165 °C

Kuumaseisokki:

- **D** Primääripiirin jäähdytys vakiopaineessa lämpötilaan 140 °C, höyrystimien täyttö ja siirtyminen vesi-vesivaiheen jäähdytykseen
- **E** Primääripiirin jäähdytys jälkilämmönpoistojärjestelmällä vesi-vesivaiheessa lämpötilaan 95 °C

Kylmäseisokki:

- **F** Siirtyminen kylmäseisokkiin ja primääripiirin paineenlasku
- **G** Primääripiirin avaaminen, reaktorin pinnanlasku ja toimenpiteet matalalla pinnankorkeudella

Latausseisokki

- **H** Toimenpiteet matalalla pinnankorkeudella kansi poistettuna ja reaktorin pinnannosto vaihtolatausta varten
- **I** Polttoaineen vaihtolataus
- **J** Reaktorin pinnanlasku vaihtolatauksen jälkeen ja toimenpiteet matalalla pinnankorkeudella kansi poistettuna

#### Kylmäseisokki

- **K** Toimenpiteet matalalla pinnankorkeudella ja reaktorin kokoaminen
- **L** Reaktorin paineistaminen paineeseen 5 bar, ilmaus ja lämmitys luonnonkierrolla

#### Kuumaseisokki

- **M** Primääripiirin lämmitys tiiveyskoelämpötilaan 100 °C ja tiiveyskoe

#### Kuumavalmius

- **N** Primääripiirin lämmitys käynnistysparametreille.

#### Käynnistystila

- **O** Reaktorin teko kriittiseksi ja pientehokokeet

#### Tehokäyttö

- **Q** Tehonnosto ja turbiinin käynnistys.

Vakitilojen kestot jakautuvat taulukon 3 mukaisesti, jolloin vuosihuollon kokonaiskesto on noin 24 päivää.

**Taulukko 3: Vuosihuoltoseisokin vakitilojen kestot**

Vakiotila	Kesto (h)
<b>B</b>	2,1
<b>C</b>	8,6
<b>D</b>	7,7
<b>E</b>	14,3
<b>F</b>	8,8
<b>G</b>	38,4
<b>H</b>	39,9
<b>I</b>	106,5
<b>J</b>	74,1
<b>K</b>	65,9
<b>L</b>	75,9
<b>M</b>	61,7
<b>N</b>	40,2
<b>O</b>	13,4
<b>Q</b>	6,9
<b>Yhteensä (h)</b>	564,2

## Luku 5

### Menetelmät

Ajasta riippuvat tarkastelut suoritetaan pääosin RiskSpectrum-ohjelmistolla ja joitakin analyysejä Excelillä. Analyysien pohjana käytetään Loviisan ykkösyksikön riskimallia PSA13, johon on mallinnettu laitospäätöyksikön vuoden 2013 vuosi- ja vuosihuollon jälkeinen konfiguraatio. PSA13-malli sisältää kappaleessa neljä käsitellyt alku- ja perustapahtumat, joiden epäkäytettävyydet on mallinnettu ajasta riippumattomiksi. Ajasta riippuvia analyysejä varten valittujen alku- ja perustapahtumien mallinnus muutetaan aikariippuvaksi. Vuosi- ja vuosihuollon aikainen riski käsitellään erikseen.

#### 5.1. Yksittäisvikojen aikariippuvuus

Loviisan ydinvoimalaitoksella komponenttien vikaantumisia havaitaan erilaisilla tavoilla, kuten oireista valvomossa, määräaikaistarkastuksissa tai käyttötarpeen tullen. Määräaikaistarkastukset ovat merkittävien vikojen havaitsemistapa, koska melkein seitsemänkymmentä prosenttia vioista havaitaan tarkastuksissa. Määräaikaistarkastuksissa havaittujen vikojen osuus kuitenkin vaihtelee järjestelmien ja laitetyyppien välillä. (Kleinberg, 2012)

Määräaikaistarkastukset aiheuttavat komponenttien epäkäytettävyyden aikariippuvuuden, mutta vikoja havaitaan myös muilla tavoilla, joiden ei oleteta olevan aikariippuvia. Näin ollen mallinnetaan, että komponentin epäkäytettävyys  $p(t)$  koostuu aikariippuvasta osasta  $p_t(t)$  ja vakio-osasta  $p_c$ . Kokonaisepäkäytettävyys  $p$  voidaan kirjoittaa

$$p(t) = p_t(t) + p_c. \quad (12)$$

Varalla olevien laitteiden epäkäytettävyyden aikariippuvaan mallinnukseen sisältyy muutamia oletuksia (Vaurio, 1997):

- Laite joko toimii tai ei toimi ja laitteen toiminnan tila tiedetään vain koestuksessa
- Koestukset suoritetaan jaksollisesti laitteen historiasta riippumatta
- Laite korjataan tai korvataan vain ja jos vain se ei toimi määräaikaiskoestuksessa
- Testaus, korjaus ja kunnossapito tehdään aina oikein ja välittömästi
- Laite uusitaan hetkellä  $t = 0$
- Laitteiden todelliset käyttötarpeet (muut kuin koestukset) ovat harvinaisia tapahtumia eivätkä vaikuta laitteen käytettävyyteen.

Loviisan riskimallissa on määritetty epäkäytettävyyksien ja vikataajuuksien arvoja komponenttien eri vikaantumistavoille. Arvot on laskettu laitoksen oman kunnossapitohistorian perusteella. Merkitään näitä laitoskokemukseen perustuvia epäkäytettävyyden ja vikataajuuden arvoja termeillä  $p_L$  ja  $f_L$ .

Laitoksen kunnossapitohistorian perusteella on myös tutkittu määräaikaiskoestuksien merkitystä vikojen havaitsemisessa (Kleinberg, 2012). Kunnossapitohistorian avulla saadaan arvot:

- määräaikaiskoestuksissa havaittujen vikojen osuus  $(1 - r)$
- muissa kuin määräaikaiskoestuksissa havaittujen vikojen osuus  $r$

Nyt komponentin epäkäytettävyyden ajasta riippumaton osuus voidaan kirjoittaa muotoon

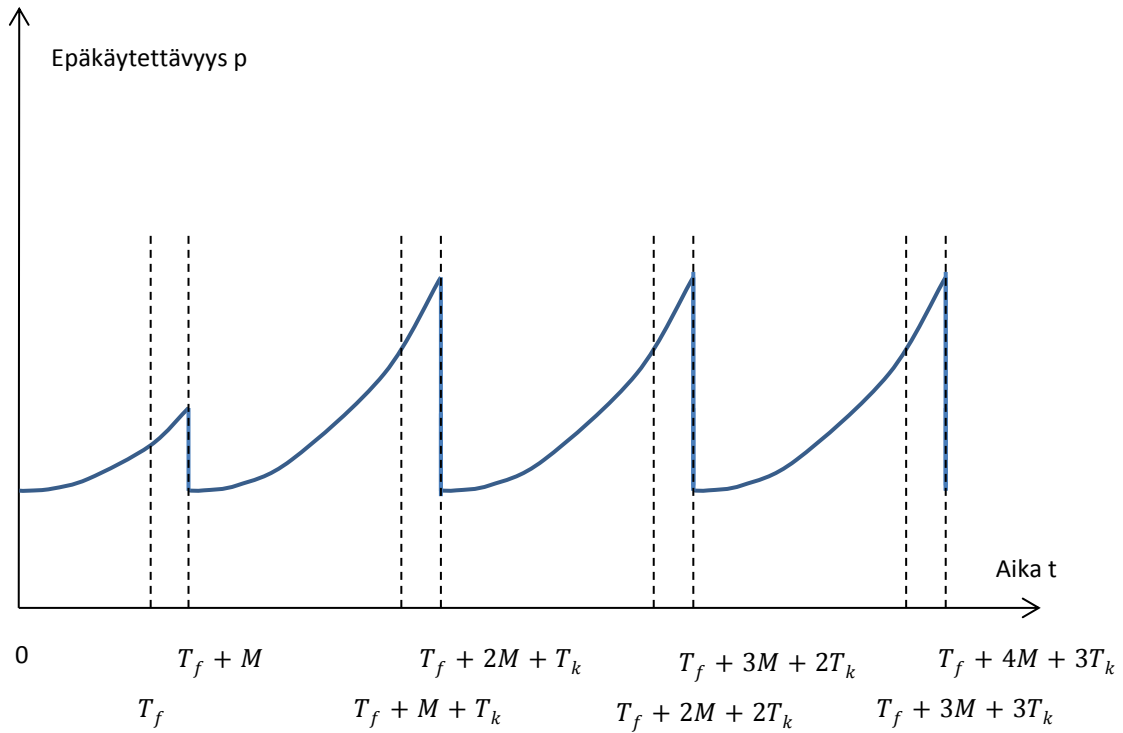
$$p_c = r * p_L. \quad (13)$$

Vastaavasti vikataajuuden ajasta riippuva osuus on

$$f_t = (1 - r) * f_L. \quad (14)$$

Epäkäytettävyyden aikariippuvuutta on havainnollistettu kuvassa 9. Laitteiden koestuskiertoja porrastetaan, joten parametri  $T_f$  on aika alkuhetkestä ensimmäiseen koestukseen.  $T_k$  on komponentin koestuskierron pituus. Epäkäytettävyys kasvaa alkuhetkestä ensimmäiseen koestukseen ja edelleen keskimääräisen korjausajan loppuun. Keskimääräinen korjausaika  $M$  on koestuksen ja sitä seuraavan korjauksen keskimääräinen pituus.

Ensimmäisen koestuksen ja keskimääräisen korjausajan jälkeen epäkäytettävyys saavuttaa miniminsä hetkellä  $T_f + M$ . Epäkäytettävyys kasvaa jälleen seuraavaan koestukseen ja keskimääräisen korjausajan loppuun asti. Epäkäytettävyys noudattaa ensimmäisen koestuksen jälkeen toistuvaa sykliä.



**Kuva 9: Koestuskierrosta johtuva laitteiden epäkäytettävyyden aikariippuvuus**

Mallintamiseen tarvittavat perustapahtumakohtaiset parametrit ovat:

- Laitoskokemuksen perusteella laskettu komponentin epäkäytettävyys  $p_L$  ja vikataajuus  $f_L$
- Muissa kuin määräaikaiskoestuksissa havaittujen vikojen osuus  $r$
- Komponentin koestuskierron pituus eli koestusväli  $T_k$
- Koestuskierron porrastus eli aika ensimmäiseen koestukseen  $T_f$
- Keskimääräinen korjausaika  $M$  eli koestuksen alusta komponentin korjauksen loppumiseen keskimäärin kestävä aika.

Epäkäytettävyydet  $p_L$  ja vikataajuudet  $f_L$  saadaan suoraan Loviisan riskimallista (Jänkälä, et al., 2013). Kunnossapitohistorian pohjalta on arvioitu  $r$ :n arvoja (Sirén, 2013). Koestuskierron pituudet  $T_k$  ja porrastukset  $T_f$  voidaan määrittää koestusohjeiden avulla. Keskimääräinen korjausaika saadaan laskettua, kun laitekohtaiset epäkäytettävyydet ja vikataajuudet ovat tiedossa.

Laitoskokemukseen perustuvat epäkäytettävyydet ja vikataajuudet lasketaan Bayesin menetelmällä Loviisan PRA:ssa. (Jänkälä, 1994) Laitteen epäkäytettävyyden laskeminen perustuu kaavaan

$$p_L = 1 - \frac{1 - e^{-f_L T_k}}{f_L T_k} * \frac{\frac{1}{M}}{f_L + \frac{1}{M}}. \quad (15)$$

Keskimääräistä korjausaikaa ei saada suoraan luotettavuusparametrin laskentaohjelmasta, joten keskimääräinen korjausaika voidaan ratkaista kaavasta 15:

$$M = \frac{1}{f_L} \left[ \frac{1 - e^{-f_L T_k}}{f_L T_k (1 - p_L)} - 1 \right]. \quad (16)$$

Kun tarvittavat laitekohtaiset parametrit on määritetty, saadaan laitteiden aikariippuvat epäkäytettävyydet laskettua RiskSpectrum-ohjelmistolla. (Scandpower AB, 2012) Laitteen epäkäytettävyys alkuhetkestä  $t = 0$  ensimmäiseen testiin on

$$p(t) = p_c + (1 - p_c) * (1 - e^{-f_L t}), \quad 0 \leq t < T_f, \quad (17)$$

joka sievenee muotoon

$$p(t) = 1 - (1 - p_c) * e^{-f_L t}, \quad 0 \leq t < T_f. \quad (18)$$

Juuri ennen koestusta epäkäytettävyys on

$$p(T_k) = 1 - (1 - p_c) * e^{-f_L T_k}, \quad t = T_f + n * T_k. \quad (19)$$

Ensimmäisen koestuksen jälkeisen keskimääräisen korjausajan aikana epäkäytettävyys saadaan laskemalla

$$p(t) = p(T_k) + (1 - p(T_k)) * (1 - (1 - p_c)e^{-f_L(t-T_k)}), \quad (20)$$

$$T_f < t < T_f + M.$$

Ensimmäisen ja sitä seuraavien koestusten jälkeen epäkäytettävyys koestusten välillä on

$$p(t) = 1 - (1 - p_c) * e^{-f_L(t-T_f)}, \quad (21)$$

$$T_f + M \leq t < T_f + M + T_k.$$

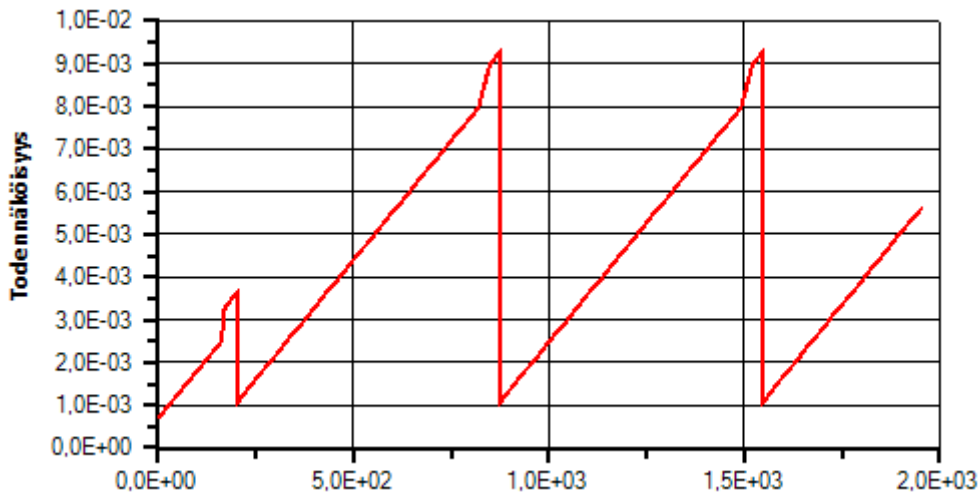
Toisen ja sitä seuraavien koestuksien jälkeisen korjausajan epäkäytettävyys on

$$p(t) = p(T_k) + (1 - p(T_k)) * (1 - (1 - p_c)e^{-f_L(t-T_f-M-T_k)}), \quad (22)$$

$$T_f + M + T_k < t < T_f + 2 * M + T_k.$$

Eli ensimmäisen koestuksen ja sitä seuraavan korjausajan jälkeen laitteen epäkäytettävyys noudattaa toistuvaa sykliä.

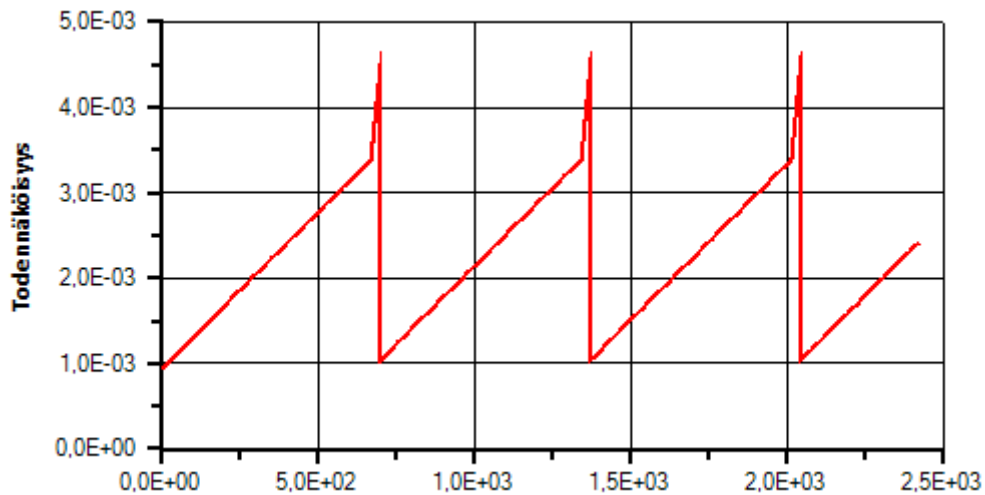
Tarkastellaan muutaman perustapahtuman ajasta riippuvaa profiilia. Kuvassa 10 on hätä dieselgeneraattorin (EY02G001AK) epäonnistuneen käynnistymisen todennäköisyys ajan funktiona. Loviisan ydinvoimalaitoksella on yhteensä neljä samankaltaista dieselgeneraattoria, jotka koestetaan neljän viikon välein ( $T_k = 672$  h). Koestukset on porrastettu viikon välein, joten järjestysluvultaan toisen generaattorin ensimmäinen koestus on porrastettu yhdellä viikolla ( $T_f = 168$  h). Vikaantumisista noin 30 prosenttia havaitaan muuten kuin määrääkaikaiskoestuksissa ( $r = 0,29$ ). Muut parametrit ovat  $p_L = 6,91 \cdot 10^{-4}$ ,  $f_L = 1,99 \cdot 10^{-6} \text{ h}^{-1}$  ja  $M = 67,9$  h.



Kuva 10: Dieselgeneraattorin epäonnistuneen käynnistymisen (EY02G001AK) ajasta riippuva todennäköisyys

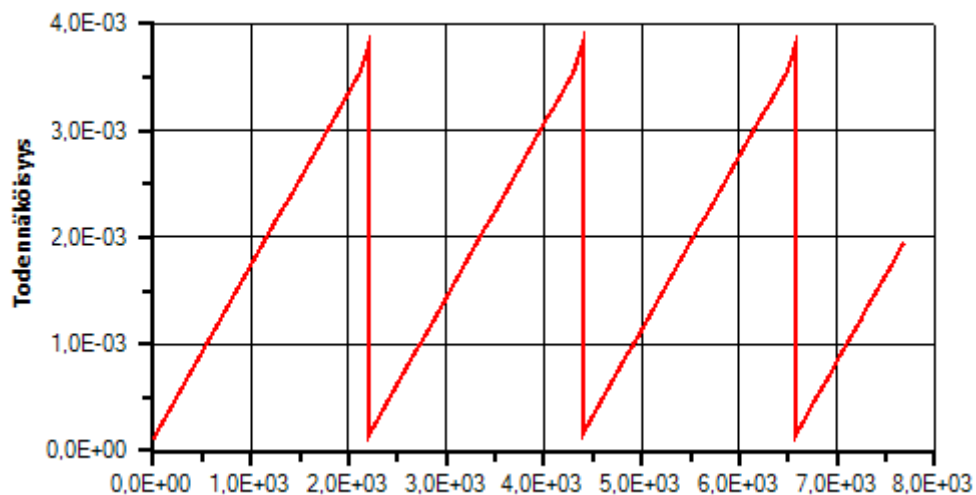
Dieselgeneraattorin kohdalla ajasta riippuva epäkäytettävyys vaihtelee arvojen  $0,5 \cdot 10^{-3}$  ja  $9,5 \cdot 10^{-3}$  välillä. Epäkäytettävyyden vakio-osuus on pieni verrattuna ajasta riippuvaan osuuteen.

Kuvassa 11 on termostaatin (TL41T005AK) toiminnan epäonnistumisen todennäköisyys. Koestusväli  $T_k$  on myös neljä viikkoa eikä koestusta ole porrastettu. Termostaateilla vioista havaitaan pienempi osuus ( $r = 0,50$ ) koestuksissa kuin esimerkiksi dieselgeneraattoreilla. Loput parametrit ovat  $p_L = 9,48 \cdot 10^{-4}$ ,  $f_L = 6,43 \cdot 10^{-7} \text{ h}^{-1}$  ja  $M = 24,1$  h. Vakioepäkäytettävyys on suhteessa merkittävämpi kuin dieselgeneraattoreilla, mutta silti kokonaisepäkäytettävyys on melkein viisinkertainen koestuksen lopussa verrattuna vakioepäkäytettävyyteen.



Kuva 11: Termostaatin toiminnan epäonnistumisen (TL41T005AK) ajasta riippuva todennäköisyys

Viimeisessä kuvassa 12 on venttiiliin (TG10S003BK) epäonnistuneen sulkeutumisen todennäköisyys ajan funktiona. Parametrit ovat  $r = 0,32$ ,  $T_k = 2184$  h,  $p_L = 1,13 \cdot 10^{-4}$ ,  $f_L = 5,64 \cdot 10^{-6}$  h<sup>-1</sup> ja  $M = 42,0$  h. Venttiilin koestuskierro on 13 viikkoa ilman porrastusta.



Kuva 12: Venttiilin epäonnistuneen sulkeutumisen (TG10S003BK) ajasta riippuva todennäköisyys

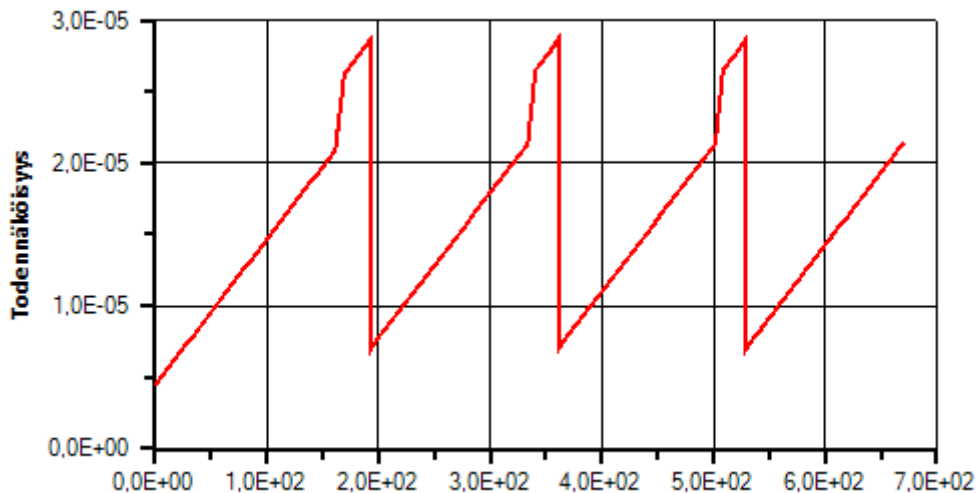
Vakioepäkäytettävyyden arvo on marginaalinen suhteessa ajasta riippuvaan osaan, mikä selittyy osittain pitkällä koestuskierolla.



## 5.2. Yhteisvikojen aikariippuvuus

Kaikkien rinnakkaisten komponenttien yhteisvikaantuessa eli täydellisessä yhteisviassa ajasta riippuva epäkäytettävyys voidaan mallintaa kuten yksittäisvikojen kohdalla. Jos esimerkiksi neljä rinnakkaista pumppua noudattaa neljän viikon koestuskiertoa porrastettuna viikon välein, voidaan pumppujen yhteisvika ajatella viikon välein koestettavaksi (täydellistä yhteisvika ei synny, jos yksikin pumppu toimii). Eli yhden pumpun koestaminen laskee koko yhteisvian todennäköisyyden minimiin.

Kuvassa 13 on neljän TJ-pumpun yhteisvian (epäonnistunut käynnistyminen) aikariippuvuus. Parametrit ovat  $r = 0,13$ ,  $T_k = 168$  h,  $p_L = 4,49 \cdot 10^{-6}$ ,  $f_L = 1,02 \cdot 10^{-7} \text{ h}^{-1}$  ja  $M = 25,40$  h. Pumput koestetaan neljän viikon välein viikon porrastuksella, joten yhteisvika koestetaan viikon välein. Aikariippuvuus yhtenee edellisen kappaleen yksittäisvikojen aikariippuvuuteen.



Kuva 13: TJ-pumppujen (TJCCD1ALLAK) täydellisen yhteisvian (epäonnistunut käynnistyminen) ajasta riippuva todennäköisyys

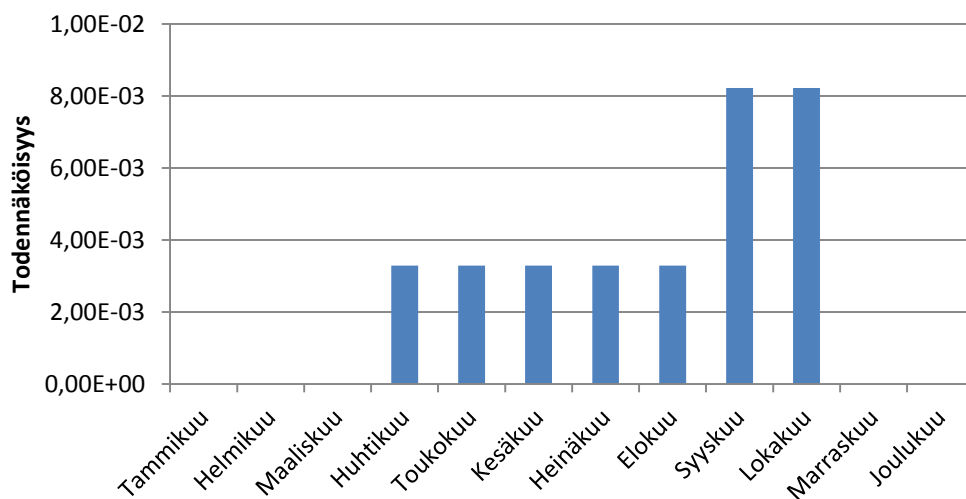
## 5.3. Vuodenaikariippuvuuksien mallintaminen

Kappaleessa 4.3 käsitellyt vuodenajasta riippuvat perus- ja alkutapahtumat mallinnetaan kuukausiperustaisesti, eli valituille perus- ja alkutapahtumille määritetään todennäköisyys tai taajuus jokaiselle kuukaudelle. Määritetään kuukausikohtaiset arvot siten, että arvojen keskiarvo vastaa PSA13-maliin alkuperäisiä koko vuotta kuvaavia arvoja. Kuukausiperustainen arviointi perustuu pääosin viimeisimpään PRA-pääraporttiin (Jänkälä, et al., 2013). Käsitellään ensin perustapahtumien mallinnus.

Levän esiintymisen todennäköisyyttä kuvaa perustapahtuma ALGAE, jonka aikaosuudeksi vuodessa on arvioitu yksi päivä. Todennäköisyys on siten

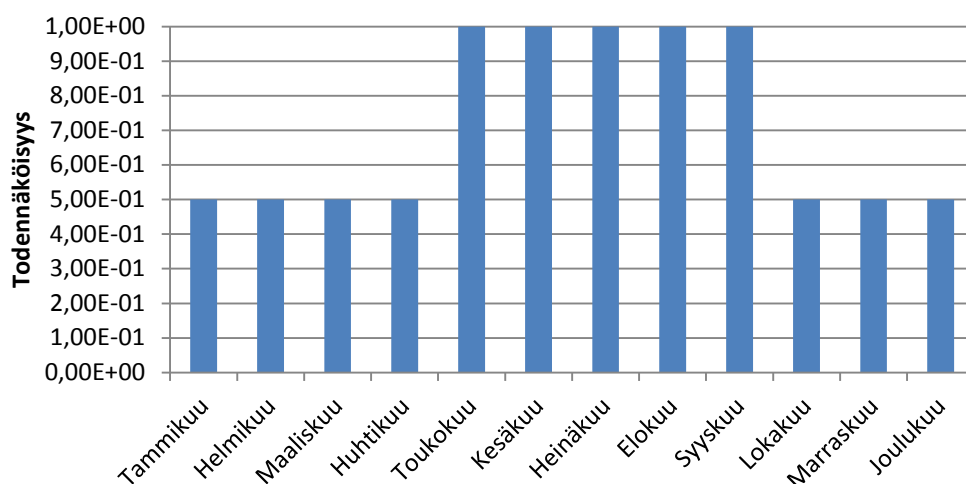
$$p_{ALGAE} = \frac{1}{365} \approx 0,00274. \quad (23)$$

Levän kannalta vaarallisia kuukausia ovat kesäkuukaudet toukokuusta lokakuuhun. Lisäksi talvikuukausista huhtikuu on vaarallinen. Kyseisestä ajasta syksyllä riski on suurimmillaan levälauttojen kuolemisen ja irtoamisen takia. Arvioidaan, että leväriskiä on huhtikuusta lokakuulle ja riskistä 50 % jakaantuu syys- ja lokakuulle ja 50 % muille kuukausille. Leväriskin kuukausijakauma on kuvassa 14.



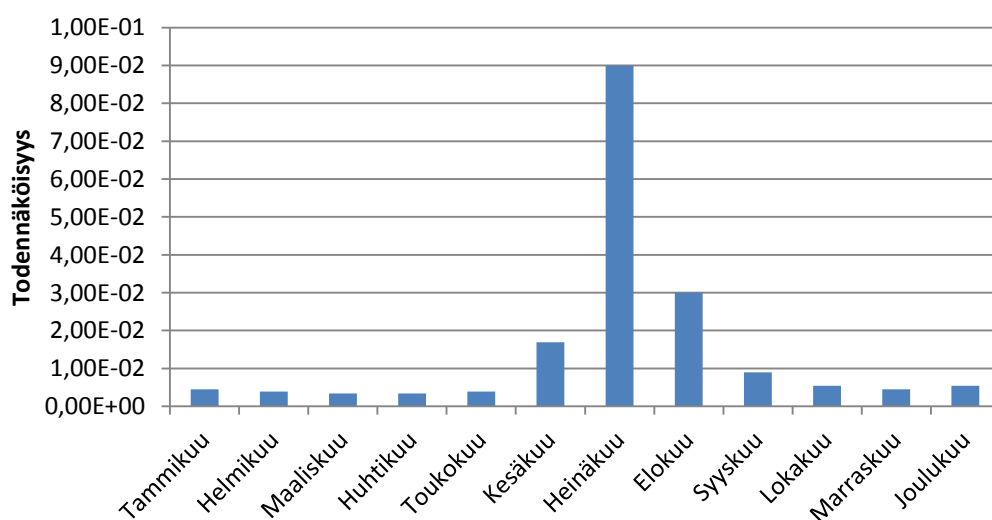
**Kuva 14: Leväalkutapahtuman (ALGAE) kuukausikohtaiset todennäköisyydet**

Perustapahtuma FIRESW kuvaa ilmastointilaitteen käymisen aikaosuutta. Ilmastointilaitteita on kaksi kappaletta ja kesäaikaan kummatkin käyvät ja talviaikaan vain toinen. Käynnin todennäköisyys on 1 toukokuusta syyskuuhun ja muina kuukausina 0,5. Kuukausittaiset todennäköisyydet ovat kuvassa 15.



**Kuva 15: Ilmastointilaitteen käymistä kuvaavan perustapahtuman (FIRESW) kuukausikohtaiset todennäköisyydet**

Matalan merenpinnan arvioinneissa on hyödynnetty Merentutkimuslaitoksen raporttia (Johansson, et al., 2008). Kuvassa 16 esimerkkinä alle -0,5 metrin merenpinnan alituksen kuukausittaiset todennäköisyydet.



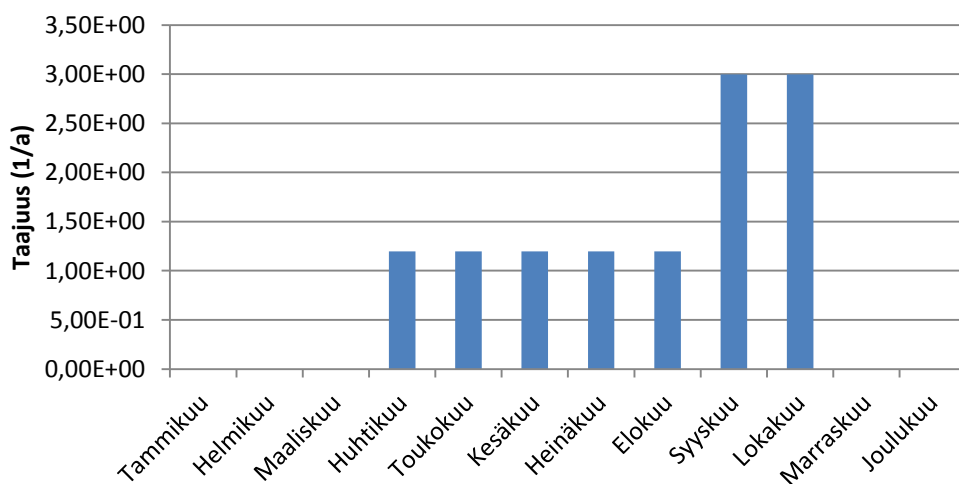
**Kuva 16: Alle -0,5 metrin merenpinnan perustapahtuman (SEALE<-05 ) kuukausikohtaiset todennäköisyydet**

Perustapahtumat WINTERTIME ja SUMMERTIME jakavat laitoksen toiminnan kesä- ja talviaikaan. PRA-mallissa talvikauden on mallinnettu kestävän lokakuusta huhtikuuhun ja kesäkauden toukokuusta syyskuuhun. Talvikauden perustapahtuman WINTERTIME todennäköisyys lokakuusta huhtikuuhun on 1 ja muina aikoina 0. Vastaavasti todennäköisyys kesäajan perustapahtumalle SUMMERTIME on toukokuusta syyskuuhun 1 ja muina aikoina 0. Todennäköisyydet havainnollistettu taulukossa 4.

**Taulukko 4: Talvi- ja kesäajan vaihteluita kuvaavien WINTERTIME- ja SUMMERTIME-perustapahtumien kuukausikohtaiset todennäköisyydet**

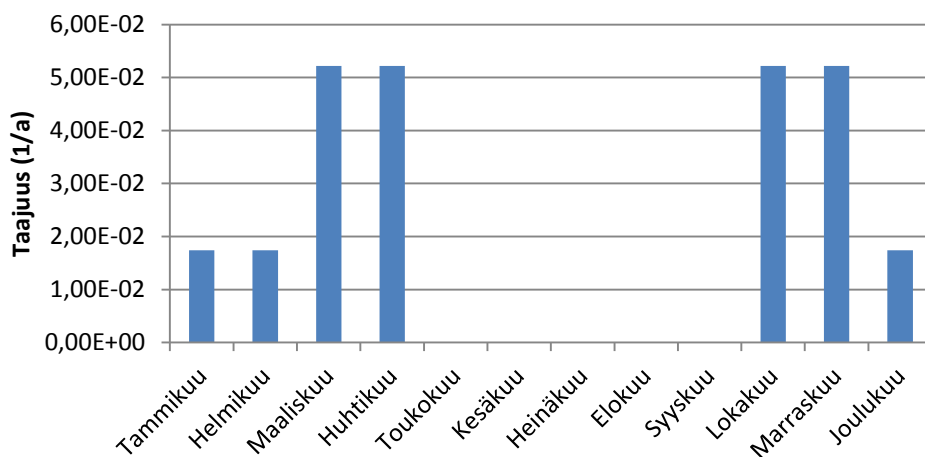
Kuukausi	Perustapahtuman todennäköisyys	
	WINTERTIME	SUMMERTIME
Tammikuu	1	0
Helmikuu	1	0
Maaliskuu	1	0
Huhtikuu	1	0
Toukokuu	0	1
Kesäkuu	0	1
Heinäkuu	0	1
Elokuu	0	1
Syyskuu	0	1
Lokakuu	1	0
Marraskuu	1	0
Joulukuu	1	0

Leväalkutapahtuma IALGAE mallinnetaan perustapahtumaa vastaavasti. Leväriski on huhtikuusta lokakuuhun ja puolet tästä riskistä osuu syys- ja lokakuulle. Leväalkutapahtuman taajuus on kuvassa 17.



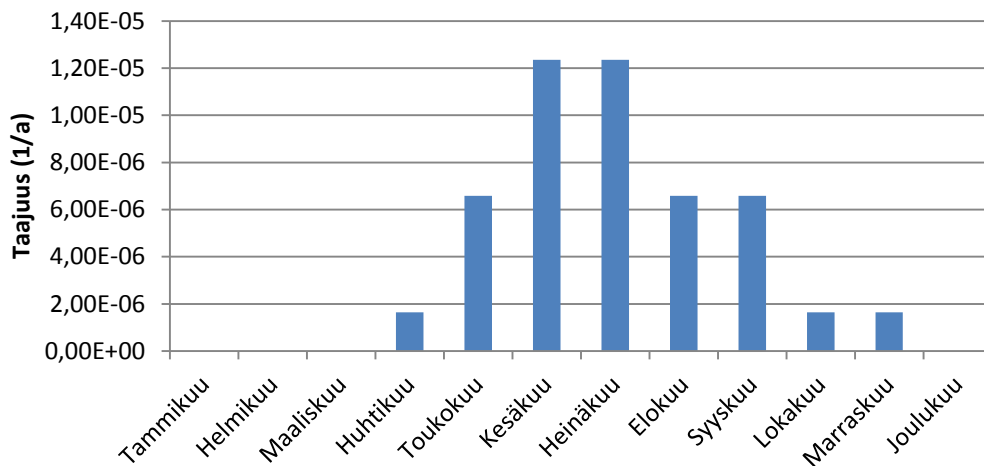
**Kuva 17: Leväalkutapahtuman (IALGAE) kuukausikohtaiset taajuudet**

Oletetaan, että veteen muodostuvista jääkiteistä aiheutuvaa supporiskiä ei ole kesäkaudella toukokuusta syyskuuhun. Toisaalta talvella jääkannen muodostuttua riskiä ei ole, joten oletetaan riskin olevan suurempi talvikauden alussa ja lopussa. Mallinnetaan riskistä 80 prosenttia osuvan maaliskuu- ja huhtikuulle sekä loka- ja marraskuulle. 20 prosenttia riskistä jakautuu välille joulukuu-helmikuu. Supon kuukausikohtainen taajuus on kuvassa 18.



**Kuva 18: Suppoalkutapahtuman (IFRICE) kuukausikohtaiset taajuudet**

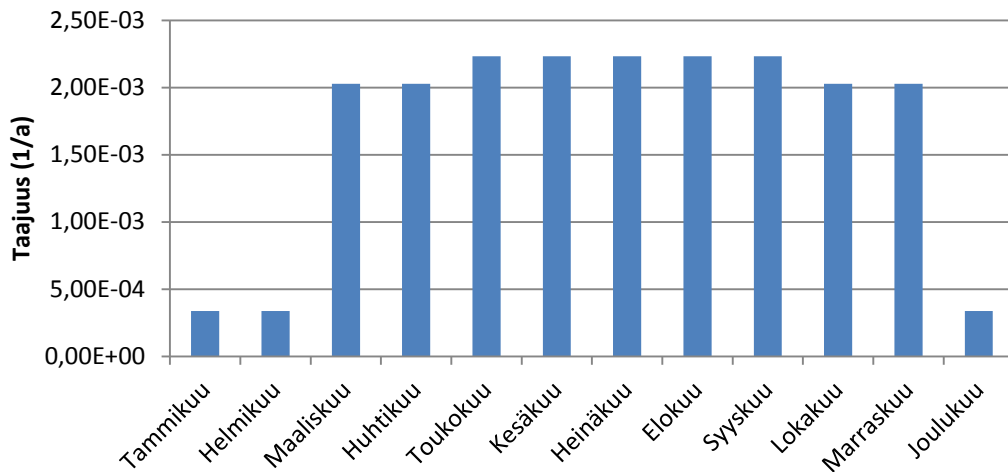
Suomessa ukkoskausi kestää keskimäärin toukokuusta syyskuuhun ja eniten salamointia on kesä- ja heinäkuun aikana. Salamointia voi kuitenkin esiintyä huhtikuussa ja vielä loka- ja marraskuussa. (Ilmatieteenlaitos, 2014) Oletetaan näiden tietojen perusteella riskistä jakaantuvan 50 prosenttia kesä- ja heinäkuulle, 40 prosenttia touko-, heinä- ja elokuulle sekä 10 prosenttia huhti-, loka- ja marraskuulle. Normaalien salamoinnin (ILIGHTA) kuukausittainen taajuusarvio on kuvassa 19. Voimakkaan salamoinnin (ILIGHTB) taajuudeksi on oletettu 1/10 normaalista salamoinnista.



**Kuva 19: Normaalien salamoinnin alkutapahtuman (ILIGHTA) kuukausikohtaiset taajuudet**

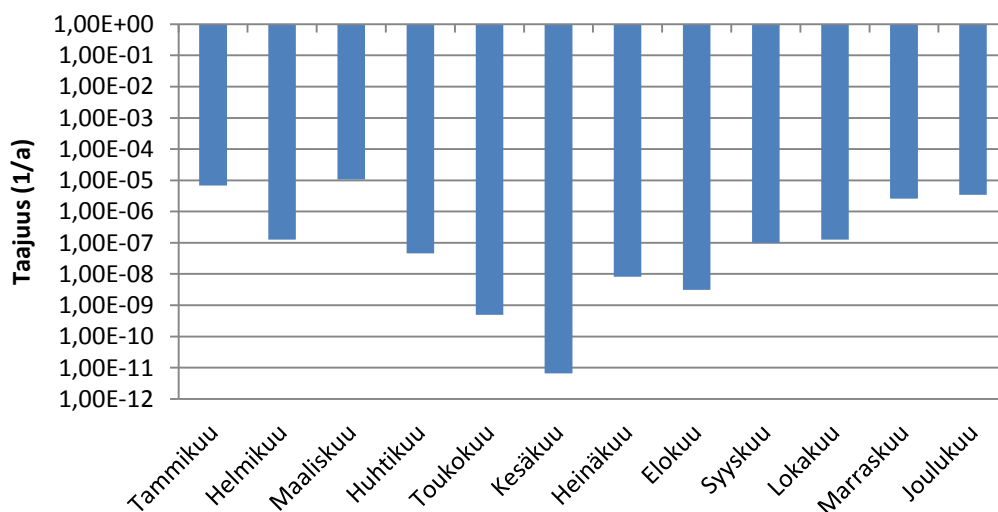
Suomenlahdella tapahtuva öljypäästö ei aiheuta riskiä jääkannen aikaan. Oletetaan öljyriskin olevan suurin kesäkaudella, hieman pienempi talvikauden lopussa ja alussa ja pienimmillään talvikauden keskellä. Mallinnetaan öljyalkutapahtuman (IOILSLICK) taajuudesta jakautuvan 5 prosenttia joulukuu-tammikuu välille, 55 prosenttia toukokuu-syyskuu välille ja 40

prosenttia muille kuukausille. Alkutapahtuman kuukausittaiset taajuudet ovat kuvassa 20.



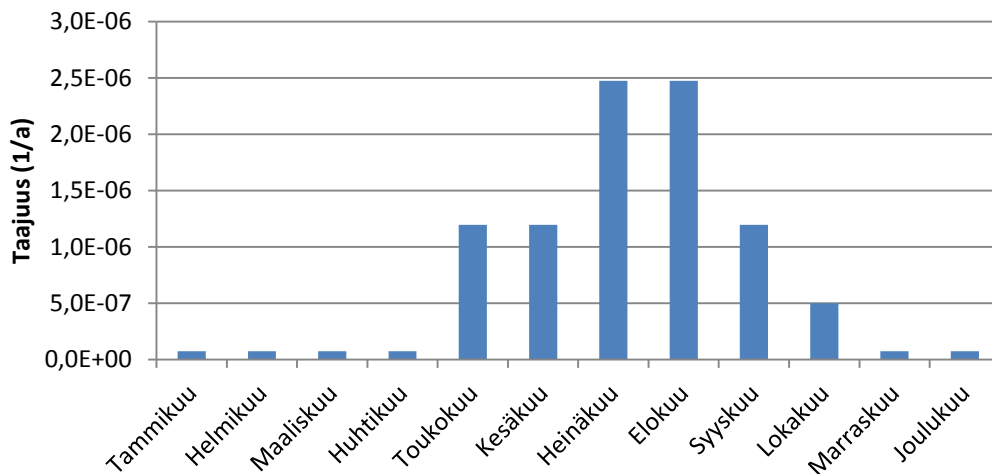
**Kuva 20: Öljypäästön alkutapahtuman (IOILSLICK) kuukausittaiset taajuudet**

Korkean meriveden alkutapahtumissa on hyödynnetty vastaavaa merentutkimuslaitoksen raporttia kuin matalan meriveden perustapahtumissa. (Johansson, et al., 2008) Meriveden pinnan kahden metrin ylityksellä (ISEAL2) on riskimerkitystä ainoastaan Loviisa 2-laitosyksikön vuosihuollon aikaan. Oletetaan LO2:n seisokin keskimääräiseksi pituudeksi 21 päivää ja keskikohdan päivämääräksi 5. syyskuuta. Näin ollen taajuus jakautuu vain elo- ja syyskuulle. Korkeammilla 2,5 metrin (ISEAL25) ja 3,0 (ISEAL3) metrin merivedenpinnan ylityksillä on riskimerkitys kaikkina kuukausina. Kuvassa 21 on 2,5 metrin ylityksen kuukausikohtaiset arviot logaritmisella asteikolla.



**Kuva 21: Korkean meriveden (yli 2,5 metriä) alkutapahtuman kuukausikohtaiset taajuudet (ISEAL25)**

Viimeinen tarkasteltu yksittäistä luonnonilmiötä koskeva alkutapahtuma on voimakas yli 45 metriä sekunnissa puhaltava tuuli (IWIND45). Riskistä 54 prosenttia muodostuu trombeista, 38 prosenttia syöksyvirtauksista ja 8 prosenttia myrskytuulista. Trombeja esiintyy Suomessa toukokuusta lokakuuhun ja kaksi kolmasosaa niistä heinä- ja elokuussa. Syöksyvirtauksia esiintyy vain kesäkaudella toukokuusta syyskuuhun. Myrskytuulista kaksi kolmasosaa osuu talvikaudelle lokakuusta huhtikuuhun. Näiden tietojen avulla saadaan kuukausikohtaiset kuvan 22 mukaiset arviot voimakkaiden tuulien alkutapahtumalle.



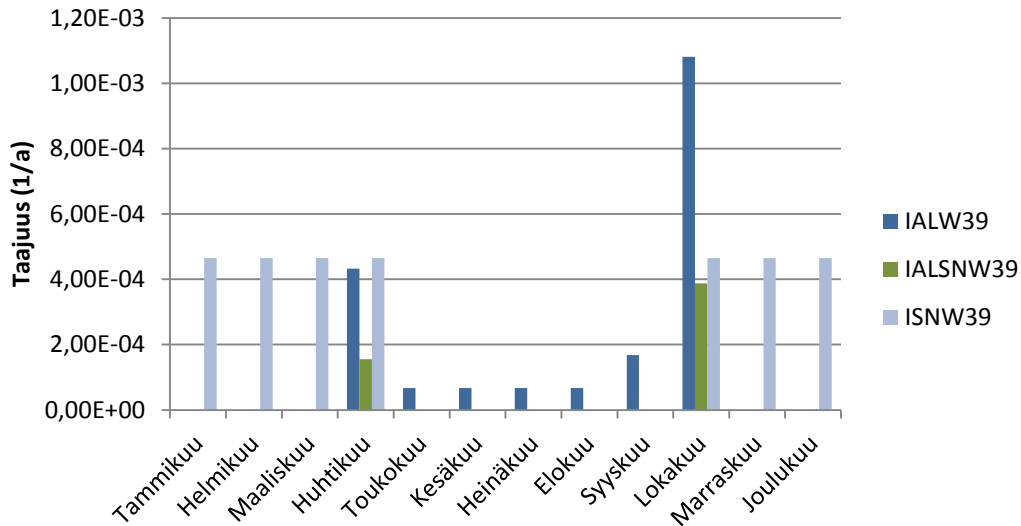
**Kuva 22: Voimakkaan tuulen (yli 45 m/s) alkutapahtuman kuukausikohtaiset taajuudet (IWIND45)**

Viimeiset viisi tarkasteluun otettua vuodenaikariippuvaa alkutapahtumaa ovat kuvaavat kahden tai kolmen luonnonilmiön samanaikaista tapahtumista.

Voimakas tuuli voi johtaa laitoksella ulkoisen sähköverkon menetykseen ja samanaikainen leväesiintymä sivumerivesipiirin menetykseen. Tapahtumaa kuvataan alkutapahtumalla IALW39. Leväriski oletettiin huhti- ja lokakuun välille ja korkeimmillaan riski on syyskuussa ja lokakuussa. Toisaalta voimakkaista yli 39 metriä sekunnissa puhaltavista tuulista 90 prosenttia osuu talvikaudelle. Alkutapahtuman IALW39 taajuus on kuvassa 23. Taajuus on korkeimmillaan lokakuussa ja huhtikuussa vajaa puolet lokakuun taajuudesta.

Jos leväesiintymään ja voimakkaaseen tuuleen lisätään samanaikainen lumimyrsky saadaan alkutapahtuma IALSNW39. Lumimyrsky voi aiheuttaa hätädiieselgeneraattoreiden menetyksen imuilma-aukkojen tukkeutuessa. Lumimyrskyn oletetaan olevan mahdollinen vain talvikaudella. Alkutapahtuma on täten mahdollinen vain huhtikuussa ja lokakuussa. Kuukausikohtaiset taajuudet ovat kuvassa 23.

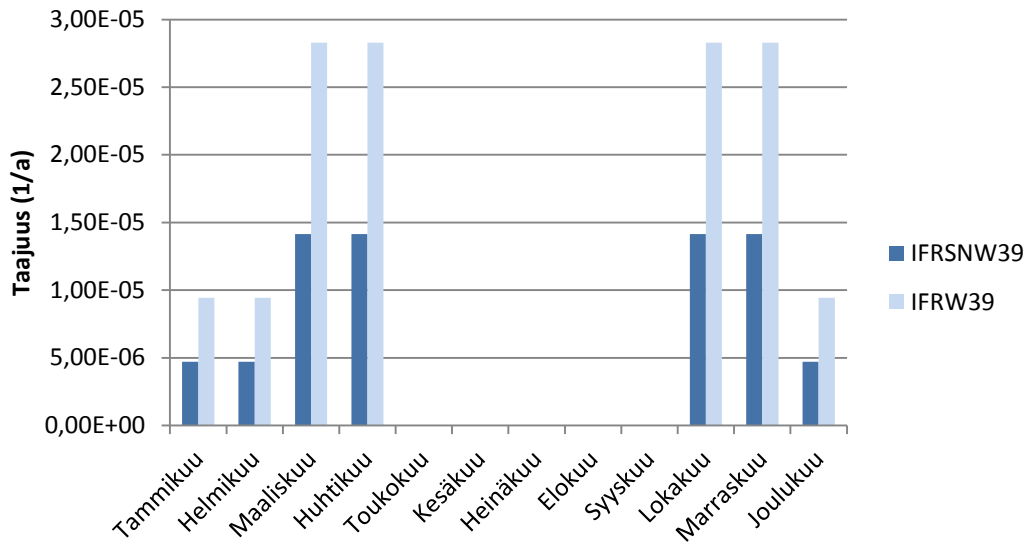
Pelkän voimakkaan tuulen ja lumimyrskyn samanaikainen mahdollisuus huomioidaan alkutapahtumalla ISNW39. Lumimyrsky oletettiin mahdolliseksi vain talvikaudella ja talvikuukausina voimakkaan tuulen taajuuksissa ei oletettu eroja. Näin ollen alkutapahtuman ISNW39 taajuus on vakio talvikuukausina ja nolla kesäaikana (kuva 23).



**Kuva 23: Voimakkaan tuulen ja levän (IALW39), voimakkaan tuulen, levän ja lumimyrskyn (IALSNW39) sekä voimakkaan tuulen ja lumimyrskyn (ISNW39) alkutapahtumien kuukausikohtaiset taajuudet**

PRA-mallissa on lisäksi huomioitu alkutapahtumina supon ja voimakkaan tuulen samanaikainen mahdollisuus (IFRW39) sekä supon, lumimyrskyn ja voimakkaan tuulen mahdollisuus (IFRSNW39). Supon oletettiin olevan mahdollinen vain talvikaudella ja suurin riski talvikauden alussa ja lopussa. Lumimyrsky on myös mahdollinen vain talvikaudella. Voimakkaiden yli 39 metriä sekunnissa puhaltavien tuulien taajuus oletettiin vakioksi talvikaudella. Näiden kahden alkutapahtuman taajuus on siten suurimmillaan maaliskuu- ja huhtikuussa sekä loka- ja marraskuussa. Joulukuun ja helmikuun välissä taajuus on noin 77 prosenttia pienempi. Taajuudet on esitetty kuvassa 24.





**Kuva 24: Supon ja voimakkaan tuulen (IFRW39) sekä supon, lumimyrskyn ja voimakkaan tuulen (IFRSNW39) alkutapahtumien kuukausikohtaiset taajuudet**

Vuodenaikariippuvien perustapahtumien todennäköisyydet ovat lisäksi liitteessä 1 ja vuodenaikariippuvien alkutapahtumien taajuudet liitteessä 2.

#### 5.4. Sydänvauriotaajuuden laskenta

Ajasta riippuvat analyysit suoritetaan RiskSpectrum-ohjelmistolla. Kappaleissa 4.1 ja 4.2 käsitellyt yksittäisvikojen ja yhteisvikojen perustapahtumat muutetaan staattisista aikariippuviksi. Aikariippuvaan mallinnukseen tarvittavat parametrit syötetään malliin.

Varsinaista laskentaa varten asetetaan haluttu aikaväli, jolla ajasta riippuva laskenta suoritetaan. Käytetään aikaväleinä yhtä ( $t = 8760$  h) ja kahta ( $t = 17520$  h) vuotta, jotta voidaan tutkia myös kahden peräkkäisen vuoden riskitasojen mahdollisia eroja. Ohjelmisto jakaa aikavälin automaattisesti tarvittaviin aikapisteisiin riippuen aikavälin pituudesta.

Laskiessaan vikaantumistodennäköisyyksiä RiskSpectrum käyttää kappaleessa 3.1 käsiteltyjä approksimaatioita hieman tarkempaa ”minimal-cutset upper-bound”-approksimaatiota (Collet, 1996):

$$P(T) \approx 1 - \prod_i (1 - P(MKJ_i)). \quad (24)$$

Ohjelmisto laskee ensin läpi kaikki tehoajon vikapuut ja tapahtumapuut, minkä jälkeen suoritetaan minimikatkosjoukkoanalyysi. Analyysin tuloksena saadaan haluttu huipputapahtuman eli sydänvaurion taajuuden aikasarja.

Vuodenaikariippuvien perustapahtumien ja alkutapahtumien huomiointia varten malliin syötetään jokaista kuukautta vastaavat tapahtumien taajuudet ja todennäköisyydet. Malli lasketaan läpi ja poimitaan halutun kuukauden sydänvauriotaajuuden aikasarja. Laskenta toistetaan kuukausikohtaisesti eli 12 kertaa. Laskentaohjelmistoon ei ole mahdollista syöttää mielivaltaisia aikariippuvuuksia, minkä vuoksi laskenta joudutaan tekemään erikseen joka kuukaudelle. Nyt sekä koestusväleistä että vuodenaikojen vaihtelusta johtuva aikariippuvuus on saatu laskettua.

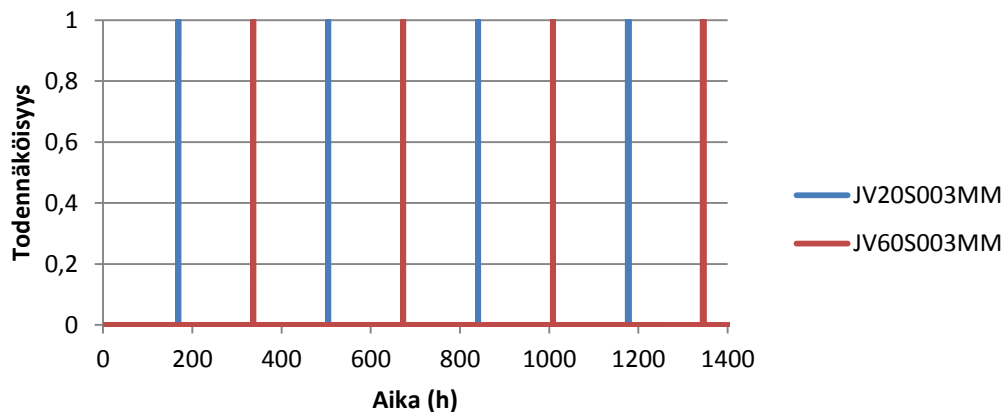
### 5.5. Koestuksien aikainen epäkäytettävyys ja työvuorojen vaikutus

Laitteiden yksittäisvikoihin ja yhteisvikoihin sekä vuodenaikariippuvuuksiin liittyvien perustapahtumien lisäksi tarkasteluun otettiin neljä muulla tavalla ajasta riippuvaa tapahtumaa:

- Koestuksen aikainen epäkäytettävyys (perustapahtumat JV20/60S003MM)
- Päivävuoron sekä ilta- ja yövuoron ajoittuminen (perustapahtumat DAYSHIFT ja NIGHTSHIFT).

Koska laskentaohjelmistolla ei ole mahdollista huomioida mielivaltaisia aikariippuvuuksia, approksimoidaan neljän perustapahtuman vaikutusta tärkeysmittojen avulla.

Perustapahtumien JV20/60S003MM ajasta riippuva todennäköisyys on kuvan 25 mukainen. Tapahtuman DAYSHIFT todennäköisyys on 1 jokaisena vuorokautena kello 8-16 ja muina aikoina 0 ja tapahtumalla NIGHTSHIFT vastaavasti toisinpäin.



**Kuva 25: Moottoriventtiilien huoltoja kuvaavien perustapahtumien JV20/60S003MM ajasta riippuva todennäköisyys**

Määritetään perustapahtumien NIGHTSHIFT ja DAYSHIFT yhteinen Fussel-Vesely-tärkeysmitan arvo  $FV_{D,N}$  ja vastaavasti yhteinen tärkeysmitan arvo  $FV_{JV20/60}$  perustapahtumille JV20/60S003MM. Lisäksi määritetään kaikille neljälle tapahtumalle erikseen arvo RIF-tärkeysmitoille, jotka merkitään  $R_N$ ,  $R_D$ ,  $R_{JV20}$  ja  $R_{JV60}$ .

Laitoksen riskitaso hetkellä  $t$  on  $f(t)$ , kun laitteiden yksittäis- ja yhteisvikaantumisten aikariippuvuus on huomioitu. Aikapisteissä, joissa perustapahtuman NIGHTSHIFT todennäköisyys on 1, sydänvauriotaajuudeksi approksimoidaan

$$f(t)_{N=1} = (1 - FV_{D,N}) * f(t) * R_N. \quad (25)$$

Vastaavasti aikapisteissä, joissa perustapahtuman DAYSHIFT todennäköisyys on 1, sydänvauriotaajuus lasketaan kaavalla

$$f(t)_{D=1} = (1 - FV_{D,N}) * f(t) * R_D. \quad (26)$$

Toimitaan vastaavalla tavalla perustapahtumien JV20/60S003MM kohdalla. Kun laitteiden vikaantumisten aikariippuvuus on huomioitu, lasketaan sydänvauriotaajuus perustapahtumien JV20/60S003MM todennäköisyyden ollessa nolla kaavalla

$$f(t)_{JV20\&60=0} = (1 - FV_{JV20\&60}) * f(t). \quad (27)$$

Perustapahtuman JV20S003MM todennäköisyyden ollessa 1 sydänvauriotaajuus on

$$f(t)_{JV20=1} = (1 - FV_{JV20\&60}) * f(t) * R_{JV20} \quad (28)$$

ja perustapahtuman JV60S003MM todennäköisyyden ollessa 1 sydänvauriotaajuus on

$$f(t)_{JV60=1} = (1 - FV_{JV20\&60}) * f(t) * R_{JV60}. \quad (29)$$

## 5.6. Seisokkitilojen sydänvauriotaajuus

Loviisan riskitutkimuksessa jokainen seisokin aikainen vakiotila on mallinnettu erikseen. Laskemalla jokaista seisokkitilaa vastaavan riskimallin sydänvauriotaajuus saadaan kappaleessa 4.6 käsiteltyjen seisokkitilojen kestojen avulla määritettyä sydänvauriotaajuuden aikasarja vuosihuollon aikaan.

## Luku 6

### Tulokset ja johtopäätökset

Tarkastellaan ensin yksittäisvikojen ja yhteisvikojen vaikutusta sydänvauriotaajuuden aikariippuvuuteen, minkä jälkeen lisätään vuodenaikariippuvuudet tarkasteluun. Lopuksi huomioidaan koestuksen aikaisen epäkäytettävyyden ja työvuorojen merkitys sekä tarkastellaan vuosihuollon aikaista sydänvauriotaajuutta.

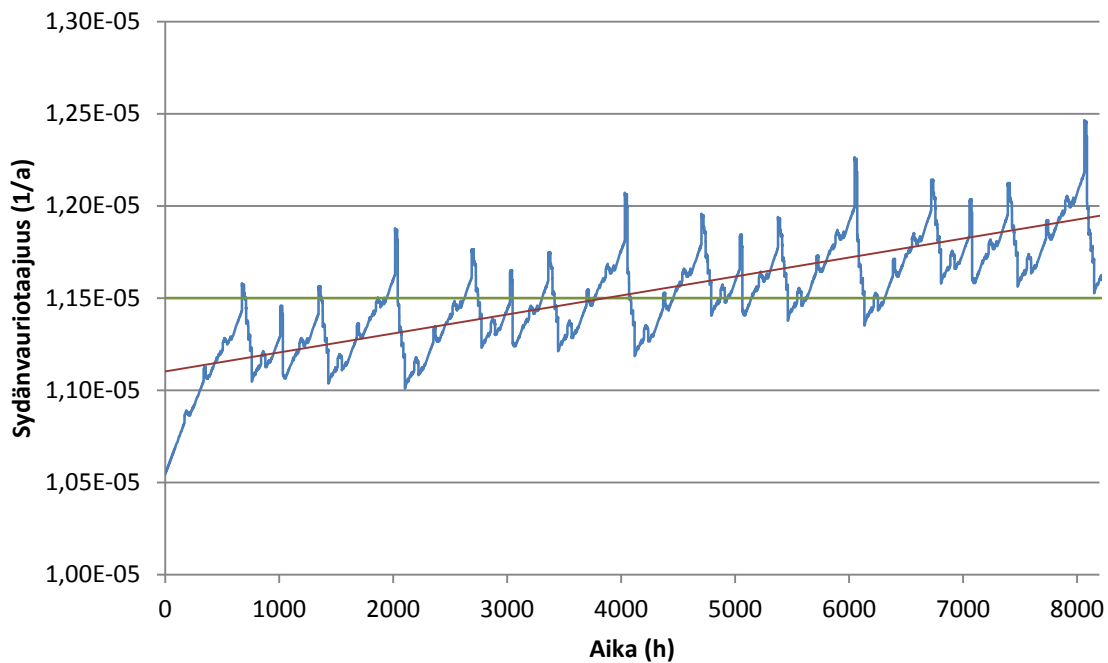
#### 6.1. Koestusvälit

Kuvassa 26 on Loviisa 1-laitosyksikön sydänvauriotaajuuden aikariippuvuus ensimmäisenä tarkasteluvuonna, kun yksittäis- ja yhteisvikojen aikariippuvuus on huomioitu.

Laskennan alkuhetkenä  $t = 0$  h voidaan pitää laitosyksikön vuosihuollon loppumista. Laskennan loppupiste on 8256 h, mikä vastaa vuoden pituutta, josta on vähennetty vuosihuollon keskimääräinen pituus 564,2 h.

Kuvaan on merkattu vihreällä poikkiviivalla laitoksen keskimääräinen sydänvauriotaajuus, joka on arvoltaan  $1,15 \cdot 10^{-5} \text{ a}^{-1}$ . Punaisella viivalla on merkattu sydänvauriotaajuuden lineaarinen sovite.

Laitoksen tehoajon sydänvauriotaajuudella on selkeä yksittäisvicioista ja yhteisvicioista johtuva aikariippuvuus. Taajuuden minimi on  $1,05 \cdot 10^{-5} \text{ a}^{-1}$  ja maksimi  $1,25 \cdot 10^{-5} \text{ a}^{-1}$ . Suhteessa sydänvauriotaajuuden keskimääräiseen arvoon aikariippuva vaihtelu on noin 8 prosenttia.



**Kuva 26: Loviisa 1-laitoyksikön tehoajon sydänvauriotaajuuden aikariippuvuus ensimmäisenä vuonna, kun yksittäisviat ja yhteisviat on huomioitu (sininen kuvaaja), lineaarinen trendi merkattu punaisella viivalla ja keskimääräinen sydänvauriotaajuus vihreällä viivalla**

Suurin osa tarkasteluun otettujen laitteiden koestusväleistä on joko kaksi viikkoa (336 h) tai neljä viikkoa (672 h). Näitä koestuksia on porrastettu keskenään yhdellä, kahdella ja kolmella viikolla. Tästä johtuen sydänvauriotaajuudessa havaitaan piikittymistä viikon välein ja kahden viikon välein voimakkaampaa piikittymistä.

Aikapisteiden  $t = 2016, 4032, 6048$  ja  $8064$  h ympäristössä taajuus saavuttaa aina maksiminsa verrattuna aikasarjan aikaisempiin arvoihin. Pääsyy on hätädieselgeneraattorin EY07G koestuksissa, joita on kuuden viikon välein (1008 h). Kyseisen hätädieselgeneraattorin riskimerkitys on korkea, koska Fussell-Vesely tärkeysmitan arvo on 2,4 prosenttia. Kun dieselgeneraattorin koestuskierto osuu yhteen muiden kahden ja neljän viikon koestuskierron laitteiden kanssa, mikä tapahtuu 12 viikon välein (2016 h), riski käy maksimissaan suhteessa edellisiin arvoihin. Tarkastelussa on myös 12 viikon koestuskierrolla olevia laitteita, jotka vaikuttavat osaltansa riskitason nousuun näissä pisteissä.

Muutaman laitteen koestuskierto on joko 13 viikkoa (2184 h) tai 16 viikkoa (2688 h). 13 viikon välein ei ole havaittavissa merkittävää taajuuden nousua suhteessa siihen, miten riski kasvaa viikon välein joka tapauksessa. 16 viikon välein voidaan kuitenkin havaita taajuuden piikittymistä.

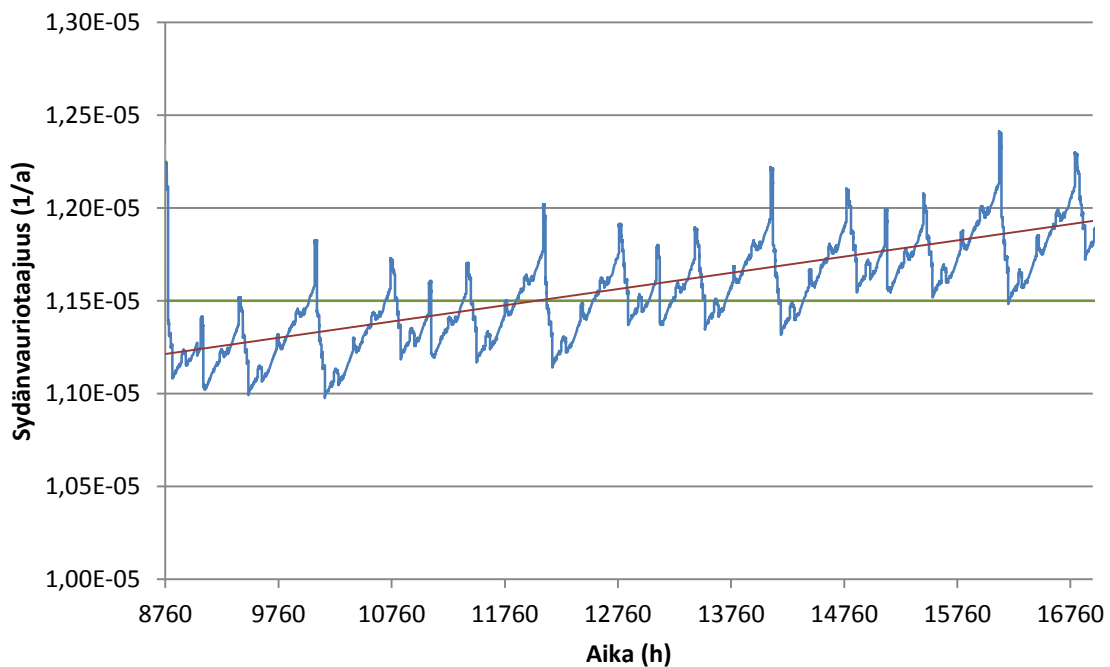
Koko vuoden aikana aikasarjassa havaitaan selkeä lineaarinen trendi, mitä havainnollistaa kuvan 26 lineaarinen sovite. Trendin aiheuttaa vuoden (8760 h) ja kahden vuoden (17520 h) välein koestettavat laitteet. Lineaarisen soviteen yhtälö on

$$f(t) = (1,031 \cdot 10^{-10} \text{ h}^{-1} \cdot t + 1,110 \cdot 10^{-5}) \text{ a}^{-1}. \quad (30)$$

Toisin sanoen sydänvauriotaajuuden arvo kasvaa tunnissa keskimäärin noin  $1,031 \cdot 10^{-10} \text{ a}^{-1}$ .

Vaikka kaikki alle vuoden koestusvälit ovat yhden viikon monikertoja, havaitaan sydänvauriotaajuuden aikariippuvuudessa kohinaa. Tämä johtuu keskimääräisistä korjausajoista, jotka on määritetty Loviisan laitoksen vikahistorian perusteella. Näin ollen riski ei piikity täysin diskreetisti viikon välein.

Koska tarkastelussa on muutamia kahden vuoden koestuskiertoa noudattavia laitteita, voidaan tutkia onko peräkkäisten vuosien riskitasossa merkittävää eroa. Kuvassa 27 on peräkkäisten vuosien toisen vuoden ajasta riippuva sydänvauriotaajuus.



**Kuva 27: Loviisa 1-laitosyksikön tehoajon sydänvauriotaajuuden aikariippuvuus toisena vuonna, kun yksittäisviat ja yhteisviat on huomioitu, lineaarinen trendi merkattu punaisella viivalla ja keskimääräinen sydänvauriotaajuus vihreällä viivalla**

Toisen vuoden keskimääräinen sydänvauriotaajuus on  $1,16 \cdot 10^{-5} \text{ a}^{-1}$ , joka on noin 0,87 prosenttia korkeampi kuin ensimmäisen vuoden keskimääräinen sydänvauriotaajuus. Peräkkäisten vuosien riskitasojen ero ei ole merkittävä.

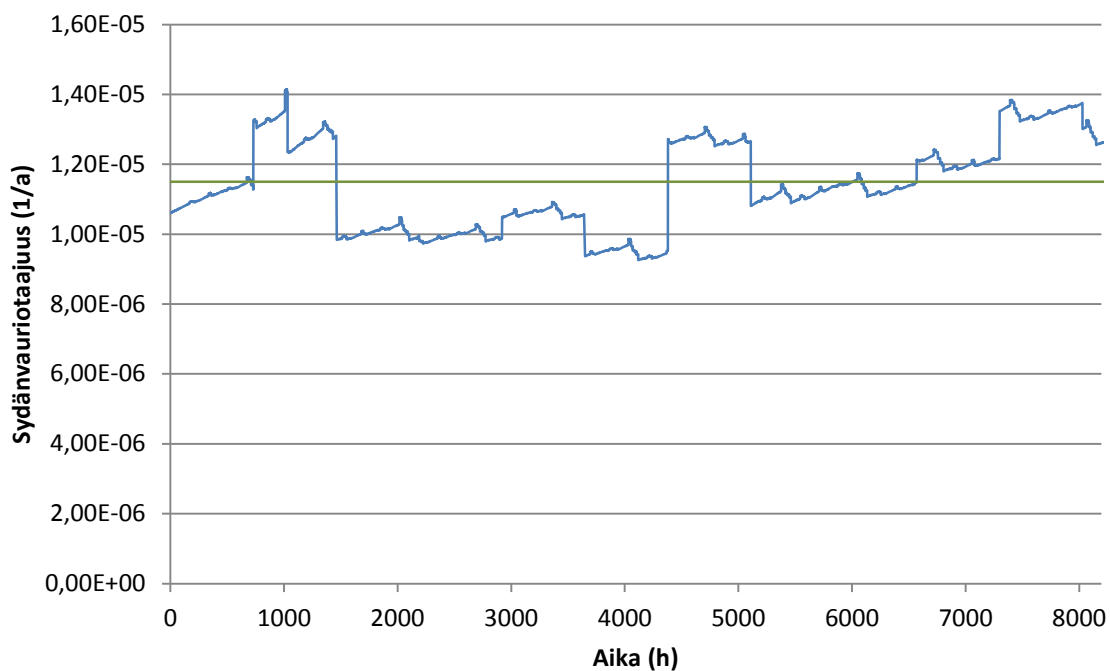
Toisen vuoden aikariippuva sydänvauriotaajuus noudattaa pitkälti samanlaista sykliä kuin ensimmäisenä vuonna. Toisen vuoden lineaarisessa sovitteessa ei ole merkittävää eroa ensimmäisen vuoden sovitteeseen.

Yksittäis- ja yhteisvikojen mallinnuksen perusteella Loviisa 1-laitosyksikön sydänvauriotaajuus muuttuu selvästi ajan funktiona. Taajuudessa havaittiin lineaarinen trendi. Peräkkäisten vuosien riskitasossa ei havaittu merkittävää eroa. Tarkastelua olisi mahdollista laajentaa esimerkiksi pienemmän riskimerkityksen laitteisiin ja rinnakkaisten laitteiden osittaisiin yhteisvikaantumisiin.

## 6.2. Vuodenaikatekijät

Vuodenaikatekijät, jotka käsiteltiin kappaleissa 4.3 ja 5.3, mallinnettiin kuukausiperusteisesti. Ajasta riippuva sydänvaurion taajuus on kuvassa 28. Oletetaan aikasarjan alkuhetkeksi syyskuun ensimmäinen päivä, jolloin laitosyksikön vuosihuolto on loppunut ja tehoajo alkanut. Kuukausiperusteisessa analyysissä ovat mukana yksittäis- ja yhteisvikojen aika-riippuvuudet.

Kuvasta 28 havaitaan riskin olevan koholla tiettyinä kuukausina. Lokakuussa, maaliskuussa ja heinäkuussa sydänvauriotaajuus on korkeampi muihin kuukausiin verrattuna. Toisaalta taajuus on matalalla talven aikaan marraskuusta helmikuuhun ja erityisen matala helmikuussa. Taajuuden maksimi on  $1,41 \cdot 10^{-5} \text{ a}^{-1}$ , joka osuu lokakuun puoleen väliin ( $t = 1026 \text{ h}$ ). Tällöin riski on noin 23 prosenttia keskiarvotason yläpuolella. Taajuuden minimi on  $0,93 \cdot 10^{-5} \text{ a}^{-1}$ , joka osuu helmikuulle ( $t = 4118 \text{ h}$ ). Arvo on 19 prosenttia pienempi verrattuna keskiarvotasoon.



**Kuva 28: Loviisa 1-laitosyksikön tehoajon sydänvauriotaajuuden aikariippuvuus (sininen kuvaaja), kun vuodenaikatekijät sekä yksittäis- ja yhteisviat on huomioitu, vihreällä viivalla merkattu keskimääräinen sydänvauriotaajuus**

Kuvan 28 perusteella syyskuun sydänvauriotaajuus on hieman keskiarvotaajuuden alapuolella. Taajuuteen vaikuttavat nostavasti voimakkaan tuulen (IWIND45) ja voimakkaan salamoinnin (ILIGHTB) alkutapahtumat. Taajuus jää kuitenkin matalaksi, koska korkean meriveden taajuudet ovat pieniä ja samanaikaiset luonnonilmiöt (IALSNW39, IFRSNW39, IFRW39 ja ISNW39) lukuun ottamatta voimakkaita tuulia ja levää (IALW39) eivät koske syyskuuta.

Lokakuun korkea sydänvauriotaajuus selittyy pitkälti kahden alkutapahtuman avulla. Levän ja voimakkaiden tuulien (IALW39) sekä levän, jäätävien olosuhteiden ja voimakkaiden tuulien (IALSNW39) yhteisilmiöiden taajuus on huomattavan korkea lokakuussa. Myös voimakkaiden tuulien ja jäätävien olosuhteiden (ISNW39) alkutapahtuma kasvattaa riskiä lokakuussa ja siitä eteenpäin koko talvikauden ajan (lokakuusta huhtikuuhun).

Marraskuussa sydänvauriotaajuus tippuu voimakkaasti alle keskiarvotason, mikä johtuu voimakkaiden tuulien (IWIND45) taajuuden laskemisesta sekä lokakuussa vallinneiden alkutapahtumien IALW39 ja IALSNW39 poistumisesta marraskuussa.



Joulukuun taajuustaso vastaa marraskuuta ja matala sydänvauriotaajuus selittyy samoilla syillä kuin marraskuussa. Voimakkaan salamoinnin (ILIGHTB) riskin pienentyminen pienentää taajuutta vielä hieman verrattuna marraskuuhun.

Tammikuussa sydänvauriotaajuus nousee hieman edellisestä kuukaudesta. Pääsyy on korkean yli kolmen metrin meriveden ylityksen alkutapahtuman (ISEAL3) taajuuden kasvussa. Myös yhden metrin ylityksen perustapahtuma (SEALEV+1) nostaa riskiä. Helmikuussa korkean meriveden taajuudet pienentyvät, mikä johtaa koko sydänvauriotaajuuden laskuun. Sydänvauriotaajuuden minimi saavutetaan helmikuussa.

Maaliskuussa sydänvauriotaajuus kasvaa voimakkaasti ja vertautuu lokakuun arvoihin. Korkean yli kolmen metrin meriveden ylityksen taajuus nousee maaliskuussa maksimiinsa, mikä on pääsyy korkealle riskille.

Huhtikuussa sydänvauriotaajuus tippuu maaliskuuhun verrattuna ja on hieman alle keskiarvotason, koska korkean meriveden pinnan riski pienenee voimakkaasti. Sydänvauriotaajuus ei kuitenkaan laske yhtä alas kuin marras- ja helmikuun välillä, koska levän ja voimakkaiden tuulien (IALW39) sekä levän, jäätävien olosuhteiden ja voimakkaiden tuulien (IALSNW39) alkutapahtumien taajuudet ovat korkeita, kuten olivat vastaavasti lokakuussa.

Toukokuun sydänvauriotaajuus ei juurikaan eroa edellisestä kuukaudesta. Voimakkaan tuulen (IWIND45) riski kasvaa, mutta korkea meriveden pinnan riskit ovat alhaalla ja kompensoivat tuuliriskin. Kesäkauteen siirtyminen nostaa hieman riskiä, mutta samanaikaisten luonnonilmiöiden taajuudet ovat vastaavasti olemattomia.

Kesäkuun sydänvauriotaajuus ylittää keskiarvotaajuuden, mikä johtuu toukokuuhun verrattuna voimakkaan salamoinnin (ILIGHTB) taajuuden kasvusta. Heinäkuussa sydänvauriotaajuus kasvaa edelleen selvästi. Erityisesti voimakkaiden tuulien (IWIND45) kontribuutio kasvattaa sydänvauriotaajuutta. Elokuussa voimakkaan salamoinnin riski pienenee ja vastaavasti sydänvauriotaajuus pienenee.

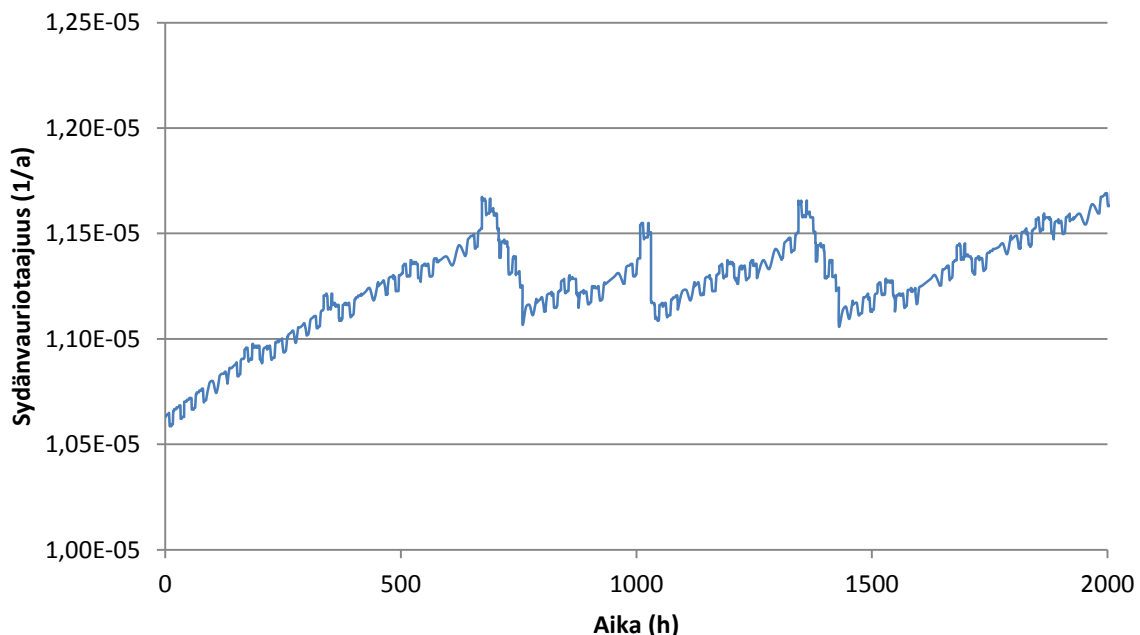
Vuodenaikatekijöiden perusteella loka-, maaliskuu ja heinäkuu ovat muita kuukausia korkeariskisempiä. Riskinousuun ovat pääsyynä levän, levän ja voimakkaiden tuulien, jäätävien olosuhteiden ja voimakkaiden tuulien, voimakkaan salamoinnin sekä korkean meriveden alkutapahtumat. Vuodenaikariippuvien tarkastelujen taustalla oleva koestusvälitarkastelun aikasarja ja sen lineaarinen trendi nostaa toisaalta sydänvauriotaajuutta aina edelliseen kuukauteen verrattuna.

Vuodenaikatekijöiden mallinnus kuukausiperusteisesti on kuitenkin melko karkea. Mallinnusta voisi pyrkiä tarkentamaan esimerkiksi päivä- tai viikkokohtaisilla arvioilla osan perus- ja alkutapahtumien kohdalla.

### 6.3. Työvuorot

Päivä-, ilta- ja yövuorojen vaikutus sydänvauriotaajuuteen on esitetty kuvassa 29. Kuvan aikasarjan pituus on 2000 tuntia, mikä vastaa noin 12:ta viikkoa. Aikasarjassa on huomioitu yksittäis- ja yhteisvikojen aikariippuvuus, mutta ei vuodenaikatekijöiden vaikutusta.

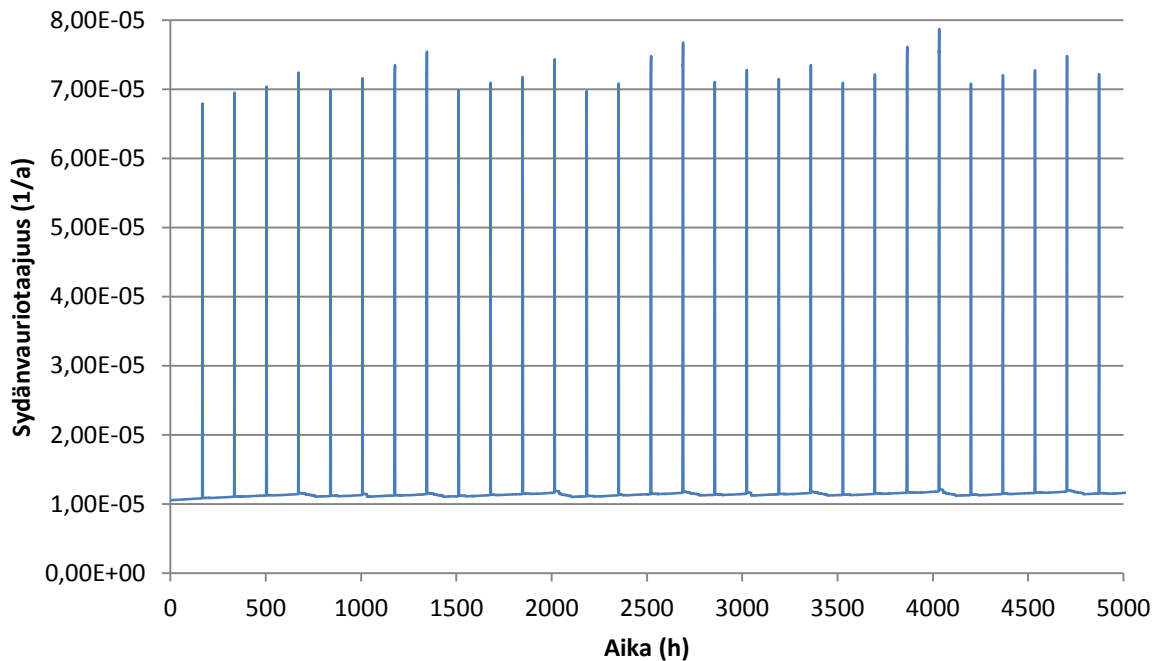
Työvuorojen vaikutus sydänvauriotaajuuteen on suoraviivainen ja näkyy aikasarjassa toistuvana sahalaitakuviona. Työvuorojen vaihtelun vaikutus riskitason muutoksiin on pieni. RIF-tärkeysmitan arvo päivävuorolle (DAYSHIFT) on 1,002 ja ilta- sekä yövuorolle (NIGHTSHIFT) 1,008, joten ilta- ja yöaikaan riski on hieman koholla verrattuna päiväaikaan. Päivävuoron aikaan laitoksella oletetaan olevan enemmän henkilöstöä töissä, joten turvallisuustoimenpiteiden suorittaminen onnistuu suuremmalla todennäköisyydellä.



**Kuva 29: Työvuorojen vaikutus (perustapahtumat DAYSHIFT ja NIGHTSHIFT)**  
Loviisa 1-laitosyksikön tehoajon ajasta riippuvaan sydänvauriotaajuuteen, kun koestusvälien vaikutus on huomioitu

#### 6.4. Koestuksien aikainen riski

Tarkastellaan kahden riskiperusteisesti hyvin merkittävän koestuksen vaikutusta sydänvauriotaajuuteen. Koestuksien JV20S003MM ja JV60S003MM aikana turvallisuudelle tärkeät moottoriventtiilit TQ/TH/TJ20S003 tai TQ/TH/TJ60S003 koestuksesta riippuen ovat pois käytöstä testauksen ja kunnossapidon takia. Kuvassa 30 on esitetty vaikutus sydänvauriotaajuuteen.



**Kuva 30: Koestuksen aikaisen epäkäytettävyyden (perustapahtumat JV20/60S003MM) vaikutus Loviisa 1-laitosyksikön tehoajon sydänvauriotaajuuteen, kun koestusvälien vaikutus on huomioitu**

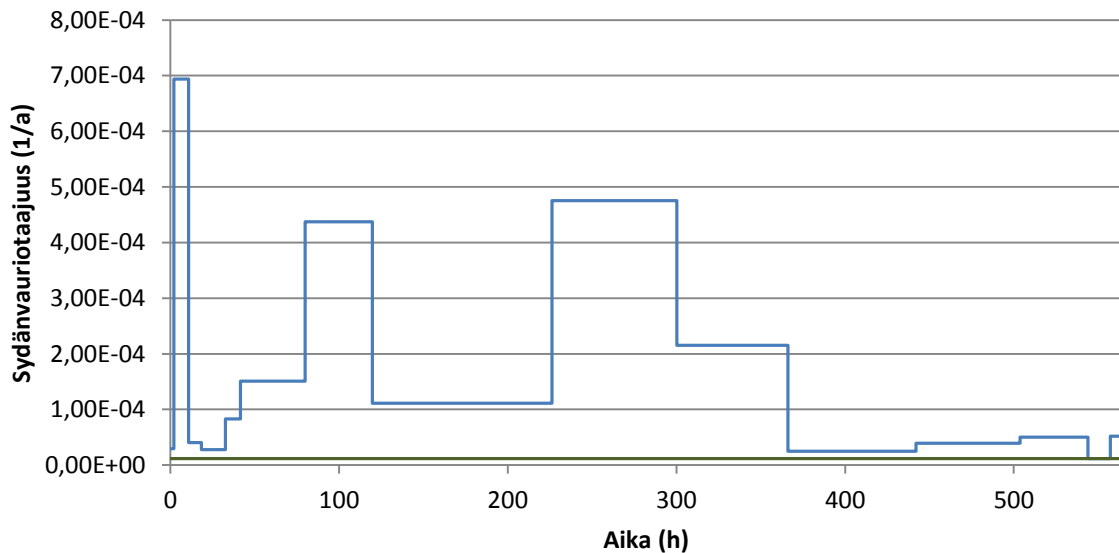
Yksittäis- sekä yhteisvikojen aikariippuvuus on mukana, mutta vuodenaikatekijöiden vaikutusta ei ole huomioitu. Tarkasteltavat koestukset aiheuttavat merkittävän mutta lyhyen diskreetin nousun sydänvauriotaajuuteen. Riskinousu kestää koestuksien keston mukaan koestettavasta redundanssista riippuen ensimmäisessä kolmessa koestuksessa vajaan tunnin ja neljännessä koestuksessa kaksi ja puoli tuntia. Vaikutus voidaan päätellä myös RIF-tärkeysmittojen arvoista, jotka ovat

- 6,25 perustapahtumalle JV20S003MM
- 6,53 perustapahtumalle JV60S003MM.

Koestuksien aikana sydänvauriotaajuus on jopa seitsenkertainen keskimääräiseen arvoon verrattuna.

## 6.5. Vuosihuolto

Seisokin aikainen ajasta riippuva sydänvauriotaajuus on kuvassa 31. Aikasarjan pituus on 564,2 tuntia ja keskimääräinen sydänvauriotaajuus on vuosihuollon aikaan  $1,75 \cdot 10^{-4} \text{ a}^{-1}$ . Tehoajon keskimääräinen sydänvauriotaajuus on merkattu kuvaan vihreällä viivalla. Vuosihuollon aikaan hetkellinen riski on selvästi korkeampi kuin tehoajon aikana.



**Kuva 31: Loviisa 1-laitosyksikön vuosihuollon aikainen ajasta riippuva sydänvauriotaajuus (sininen kuvaaja) ja tehoajon aikainen keskimääräinen sydänvauriotaajuus (vihreä viiva)**

Hetkellinen riski on korkeimmillaan vakiotiloissa C, H ja J. Vakiotilassa C riskiä nostaa keskiuuden paineistimen varoventtiilivuodon mahdollisuus. Vaikka vakiotilan hetkellinen riski on korkea, on sen aikaosuus kuitenkin vain noin yhdeksän tuntia. Vakitilojen H ja J korkean riskin selittää pääosin laitoksella tehtävät raskaat nostot, joihin kuuluvat reaktorin paineastian kannen ja sisäosien nostot.

Muita merkittäviä vuosihuollon aikaista riskiä nostavia tapahtumia ovat primääripiirin vuodot, salamointi, öljyjonnettomuudet, palotapahtumat, reaktiivisuusonnettomuudet sekä instrumenttitilojen ilmastoinnin menetys. (Jänkä, et al., 1998)

## Luku 7

### Yhteenveto ja jatkotutkimusmahdollisuudet

Todennäköisyyspohjaisen riskianalyysin peruslaskenta antaa tuloksena keskimääräisen ajasta riippumattoman arvion ydinvoimalaitoksen sydänvaurio-taajuudelle. Ajasta riippuvilla analyyseillä tutkitaan, miten riskitaso muuttuu ajan funktiona ja pyritään määrittämään tekijöitä, jotka nostavat hetkellistä riskiä merkittävästi. Ajasta riippuvia analyysejä voidaan soveltaa Loviisan riskitutkimuksessa esimerkiksi tapauskohtaisten riskien arvioinnissa. Diplomityössä määritettiin ajasta riippuva sydänvaurio-taajuus Loviisan ydinvoimalaitokselle.

Ajasta riippuvat tarkastelut suoritettiin RiskSpectrum-ohjelmistolla ja taulukkolaskentaohjelmistolla. Aihetta rajattiin siten, että tarkastelut suoritettiin vain Loviisa 1-voimalaitosyksikölle. Analyysit tehtiin laitoksen tehoajolle, mutta vuosihuollon aikaiset seisokkitilat tarkasteltiin myös lyhyesti.

Työssä tarkasteltavat ajasta riippuvat ilmiöt jakautuvat tehoajolla kahteen kategoriaan. Ensimmäiseen kategoriaan kuuluvat ydinvoimalaitoksen laitteiden yksittäisvikojen ja yhteisvikojen perustapahtumat, joiden epäkäytettävyyden aikariippuvuus muodostuu laitteiden koestuskierroista. Toinen kategoria on alku- ja perustapahtumat, joiden taajuus ja epäkäytettävyys riippuu vuodenajasta tai vuorokaudenajasta. Kummankin kategorian alku- ja perustapahtumia on edelleen karsittu riskiperusteisesti. Tarkasteluun on valittu vain riskitasoon merkittävästi vaikuttavat tapahtumat Fussell-Vesely-tärkeysmittojen perusteella.

Koestuskierron mukaan muuttuvat laitteiden epäkäytettävyydet koskevat tiettyjä Loviisan laitoksen järjestelmiä. Laitteita on kerätty eri laitetyypeistä ja tietyt vikaantumistavat on huomioitu. Yhteisvicioista on valittu ainoastaan niin sanottuja täydellisiä yhteisvikoja, joissa rinnakkaisista laitteista kaikki

vikaantuvat samanaikaisesti yhteisestä syystä. Yhteensä yksittäis- ja yhteisvikojen perustapahtumia otettiin tarkasteluun 294 kappaletta.

Vuorokauden- ja vuodenajan mukaan vaihtelevia perus- ja alkutapahtumia tarkasteluun valittiin 26 kappaletta. Tapahtumat kuvaavat mm. meriveden pinnankorkeuden vaihteluita, levä-, salama- ja öljyriskejä, voimakkaiden tuulien mahdollisuutta ja työvuorojen vaihtelua laitoksella. Alkutapahtumissa on huomioitu myös erilaisten samanaikaisten luonnonilmiöiden mahdollisuus.

Ajasta riippuvien analyysien perustana on PSA13-malli, joka kuvaa Loviisa 1-voimalaitosyksikön vuoden 2013 vuosihuollon jälkeistä tilaa. Yksittäisvikojen aikariippuvuuden mallintamiseksi valitut perustapahtumat muutetaan ajasta riippuviksi. Mallinnuksessa laitteen epäkäytettävyyden oletetaan muodostuvan ajasta riippumattomasta vakio-osasta sekä ajasta riippuvasta osasta.

Vakio-osa vastaa niitä vikaantumisten havaitsemistapoja, jotka oletetaan ajan suhteen muuttumattomiksi. Ajasta riippuva osuus noudattaa mallia, jossa laitteen epäkäytettävyys on minimissään välittömästi koestuksen jälkeen. Koestuksen jälkeen epäkäytettävyys kasvaa aina seuraavaan koestukseen asti, jolloin epäkäytettävyys saavuttaa maksiminsa. Koestuksen jälkeen epäkäytettävyys saavuttaa jälleen miniminsä. Ajasta riippuva epäkäytettävyys noudattaa siten toistuvaa sykliä.

Mallintamiseen tarvittavat laitekohtaiset parametrit ovat epäkäytettävyys, vikataajuus, muissa kuin määräaikaiskoestuksissa havaittujen vikojen osuus, koestusvälin pituus, koestuskiertoja porrastava aika ensimmäiseen koestukseen ja keskimääräinen korjausaika. Epäkäytettävyydet ja vikataajuudet saadaan laitoksen riskimallista. Eri vikaantumisen havaitsemistapojen osuuksia on määritetty laitoskokemuksen perusteella. Koestusvälien pituudet ja porrastukset määritetään koestusohjeissa. Keskimääräiset korjausajat lasketaan epäkäytettävyyksien ja vikataajuuksien avulla.

Yhteisvikojen ajasta riippuva mallinnus yhtyy yksittäisvikojen mallinnukseen. Täydellinen yhteisvika ei ole mahdollinen, jos yksikin rinnakkainen laite toimii. Näin ollen täydellinen yhteisvika koestetaan aina, kun rinnakkaisista laitteista yksikin laite koestetaan.

Vuodenaikariippuvien tapahtumien mallinnus suoritetaan kuukausi-perusteisesti. Kuukausi-perusteinen mallinnus perustuu pääosin viimeisimpään PRA-pääraporttiin. Kuukausikohtaiset parametrit määritetään siten, että kuukausikohtaisten arvojen keskiarvo yhtyy PRA-mallin vuosikohtaisiin keskiarvoihin.

Varsinaista sydänvauriotaajuuden aikariippuvaa laskentaa varten RiskSpectrum-ohjelmisto jakaa tarkasteltavan aikavälin aikapisteisiin. Sydän-

vauriotaajuuden arvo aikapisteissä lasketaan minimikatkosjoukkoanalyysin avulla käyttäen ”minimal-cutset upper-bound”-approksimaatiota. Ensin lasketaan pelkkien koestusvälien vaikutus ajasta riippuvaan sydänvauriotaajuuteen. Seuraavaksi riskimalliin syötetään vuodenaikariippuvien tapahtumien kunkin kuukauden parametrit ja lasketaan malli läpi. Toistamalla laskenta 12 kertaa saadaan kunkin kuukauden sydänvauriotaajuuden aikasarja ja edelleen koko vuoden sydänvauriotaajuuden kehitys.

Vuorokaudenaikariippuvien tapahtumien huomioinnissa hyödynnetään taulukkolaskentaohjelmistoa, koska RiskSpectrum-ohjelmistoon ei ole mahdollista syöttää mielivaltaisia aikariippuvuuksia. Työvuorojen vaikutusta ja koestuksen aikaista epäkäytettävyyttä kuvaavien perustapahtumien vaikutus approksimoidaan Fussell-Vesely- ja RIF-tärkeysmittojen avulla.

Lopullisen laskennan tulokset jakautuvat koestusvälien vaikutukseen, vuodenaikariippuviin ilmiöihin ja vuorokaudenaikariippuviin tapahtumiin sekä vuosihuollon aikaiseen sydänvauriotaajuuteen.

Koestusvälit aiheuttavat Loviisa 1-laitosyksikön sydänvauriotaajuuteen selvän aikariippuvuuden. Sydänvauriotaajuuden aikasarjan vaihtelu keskimääräiseen arvoon ( $1,15 \cdot 10^{-5} \text{ a}^{-1}$ ) verrattuna on noin kahdeksan prosenttia. Taajuus noudattaa toistuvaa sykliä, jossa tapahtuu vaihtelevasti viikon välein piikittymistä, koska kaikki alle vuoden koestusvälien pituudet ovat yhden viikon monikertoja. Lisäksi sydänvauriotaajuudessa on lineaarinen trendi, mikä johtuu yhden ja kahden vuoden koestuskierroista. Aikasarjassa havaitaan lievää kohinaa, jonka aiheuttavat laitoshistorian perusteella määritetyt keskimääräiset korjausajat.

Koska tarkastelussa on muutamia kahden vuoden koestuskierrolla olevia laitteita, voidaan tutkia peräkkäisten vuosien mahdollisia eroja sydänvauriotaajuudessa. Toisen vuoden sydänvauriotaajuus ei kuitenkaan eroa merkittävästi ensimmäisestä vuodesta ja toisen vuoden keskimääräinen sydänvauriotaajuus on alle prosentin suurempi kuin ensimmäisen vuoden.

Kuukausiperusteisesti mallinnetut vuodenaikatekijät vaikuttavat selvästi sydänvauriotaajuuden aikakehitykseen. Ajasta riippuva sydänvauriotaajuus vaihtelee arvojen  $0,93 \cdot 10^{-5} \text{ a}^{-1}$  ja  $1,41 \cdot 10^{-5} \text{ a}^{-1}$  välillä eli keskimääräiseen arvoon verrattuna aikariippuva sydänvauriotaajuus on minimissään 19 prosenttia matalampi ja maksimissaan 23 prosenttia korkeampi, kun laskennassa on huomioitu myös koestusvälien vaikutus.

Tulosten perusteella lokakuu, maaliskuu ja heinäkuu ovat korkeamman riskin kuukausia ja talvikuukaudet marraskuusta helmikuuhun matalan riskin kuukausia. Muut kuukaudet ovat melko lähellä sydänvauriotaajuuden

keskimääräistä arvoa. Suurimman vaikutuksen aiheuttavat korkeaan meriveteen, voimakkaisiin tuuliin sekä voimakkaaseen salamointiin liittyvät alkutapahtumat. Lisäksi erilaiset samanaikaisten luonnonilmiöiden alkutapahtumat ovat merkittävässä roolissa.

Vuorokaudenaikariippuvat tapahtumat liittyivät laitoksen työvuorokiertoon ja koestuksen aikaiseen epäkäytettävyyteen. Työvuorokierrot vaikuttavat aikariippuvuuteen siten, että päivävuoron aikaan riski on matalampi kuin iltaja yövuoron aikaan. Ilta- ja yövuoron aikaan laitoksella on vähemmän henkilökuntaa töissä, joten mahdollisesti tarvittavia turvallisuustoimenpiteitä on suorittamassa vähemmän ihmisiä.

Tarkasteluun valitut kaksi perustapahtumaa, jotka kuvaavat koestuksen aikaista epäkäytettävyyttä, aiheuttavat sydänvauriotaajuuteen voimakkaan viikon välein toistuvan diskreetin piikin. Perustapahtumat huomioivat kolme riskiperusteisesti merkittävää eri redundanssien moottoriventtiiliä, joiden epäkäytettävyys testauksen takia aiheuttaa taajuuden piikittymisen.

Vuosihuollon aikaan ajasta riippuva sydänvauriotaajuus vaihtelee seisokkivakiotilojen mukaan ja on koholla verrattuna tehoajon sydänvauriotaajuuteen. Vuosihuollon aikaista taajuutta nostavat mm. riskit, jotka liittyvät raskaiden taakkojen nostoihin ja primääripiirin vuotoihin.

Loviisa 1-voimalaitosyksikön aikariippuvan sydänvauriotaajuuden määrittäminen onnistui hyvin ja diplomityön tavoitteet saavutettiin. Laitosyksikön sydänvauriotaajuudella on selkeä aikariippuvuus. 1990-luvun alussa tehtyihin ajasta riippuviin analyyseihin verrattuna tarkasteluun otettujen laitteiden määrä laajeni huomattavasti. Lisäksi diplomityö laajensi tutkimuksen vuodenaikariippuviin ja vuorokaudenaikariippuviin ilmiöihin.

Tarkasteluita on edelleen mahdollista laajentaa. Mahdollisia eroja Loviisa 2-laitosyksikön aikariippuvuuksissa voi tutkia ja sitä kautta laajentaa tarkastelut koskemaan kumpaakin laitosyksikköä ja koko ydinvoimalaitosta.

Laitemäärää voi edelleen kasvattaa pienemmän riskimerkityksen laitteisiin ja yhteisvikatapauksissa on mahdollista huomioida osittaisia yhteisvikoja. Vuodenaikariippuvien tapahtumien mallinnus esimerkiksi viikkoperusteiseksi tarkentaisi sydänvauriotaajuuden aikakehitystä.



## Lähdeluettelo

Andsten, R. & Kovanen, J., 1990. *Loviisa 1 Riskitutkimus, Pääraportti, Kansio: 6, Ajasta Riippuvat Analyysit*. Imatran Voima Oy.

Borgonovo, E. & Apostolakis, G. E., 2001. A New Importance Measure for Risk-informed Decision Making. *Reliability Engineering and System Safety*, 72:193.

Collet, J., 1996. Some Remarks on Rare-Event Approximation. *IEEE Transactions on Reliability*, 45(1):106-108.

Energiateollisuus ry, 2014. *Sähköntuotanto*.

Saatavilla: <http://energia.fi/energia-ja-ymparisto/sahkontuotanto>  
(haettu 24.2.2014).

Fortum Generation, ei pvm. *Loviisan voimalaitos*.

Saatavilla:

[https://www.fortum.fi/SiteCollectionDocuments/Energy%20production/106-voimalaitos/esite\\_fin.pdf](https://www.fortum.fi/SiteCollectionDocuments/Energy%20production/106-voimalaitos/esite_fin.pdf)  
(haettu 1.5.2014).

Fortum Keilaniemi, 2013. *Voimalaitoksen toiminta*.

Saatavilla:

[http://www.fortum.com/fi/energiantuotanto/ydinvoima/loviisan\\_voimalaitos/vl-toiminta/sivut/default.aspx](http://www.fortum.com/fi/energiantuotanto/ydinvoima/loviisan_voimalaitos/vl-toiminta/sivut/default.aspx)  
(haettu 4.3.2014).

Fortum Keilaniemi, 2014. *Fortumin Loviisan Ydinvoimalaitoksella Hyvä Tuotantovuosi 2013*.

Saatavilla: <https://www.fortum.fi/fi/media/Pages/fortumin-loviisan-ydinvoimalaitoksella-hyva-tuotantovuosi-2013.aspx>  
(haettu 6.3.2014).

Fortum Power and Heat Oy, 2010. *LO1&2 Final Safety Analysis Report (FSAR)*, Espoo: Fortum Power and Heat Oy.

- Fortum Power and Heat Oy, 2014. *Loviisan Esittelymateriaalia*. Saatavilla: <http://portal.fortum.com/sites/FNSLoviisaYleis/default.aspx> (haettu 18.2.2014).
- Hilsmeier, T. A., Aldemir, T. & Vesely, W. E., 1995. Time-dependent Unavailability of Aging Standby Components Based on Nuclear Plant Data. *Reliability Engineering and System Safety*, 47:199-205.
- ICJT, 2014. *The History of Nuclear Technology*. Saatavilla: <http://www.icjt.org/en/jedrska-tehnologija/zgodovina-jedrske-tehnologije/> (haettu 20.2.2014).
- IEA, 2012. *World Energy Outlook*. Pariisi: OECD.
- Ilmatieteenlaitos, 2014. *Salamat ja Ukkonen*. Saatavilla: <http://ilmatieteenlaitos.fi/salama-ja-ukkonen#12> (haettu 20.8.2014).
- INSAG, 1996. *Defence in Depth in Nuclear Safety*, Wien, Itävalta: IAEA.
- Johansson, M. ym., 2008. *Meriveden Pinnankorkenden Ääri-ilmiöt Loviisan ja Olkiluodon Rannikoilla*. Helsinki: Merentutkimuslaitos.
- Jänkälä, K., 1994. *Information About Mathematical Methods*, s.l.: Ivo International Oy.
- Jänkälä, K., 2014. *PSA - PRA*, Espoo: Fortum.
- Jänkälä, K., Järvenpää, S., Paavola, I. & Siren, S., 2013. *Loviisa 1 Riskitutkimus*. Espoo: Fortum.
- Jänkälä, K., Mohsen, B. & Vaurio, J.K., 1998. PSA for Shutdown Modes of Loviisa NPP. *Int. Conf. on Probabilistic Safety Assessment and Management, PSAM 4*. New York.
- Kelavirta, T., 2011. *Käz-merkintäjärjestelmä Loviisan Voimalaitoksella*, Loviisa: Fortum Power and Heat Oy.
- Kleinberg, R., 2012. *Turvallisuudelle Tärkeiden Laitteiden Koestusten Merkitys Vikojen Havaitsemisessa, Kandidaatintyö*, Espoo: Aalto Yliopisto/Perustieteiden korkeakoulu.
- Laitonen, J., 2010. *Todennäköisyyspohjainen Riskien Seuranta Ydinvoimalaitosten Valvonnassa, Diplomityö*, Helsinki: STUK.
- Martorell, S., Sanchez, A. & Serradell, V., 1999. Age-dependent reliability model considering effects of maintenance and working conditions. *Reliability Engineering & System Safety*, 64:19-31.

- Michelsen, K.-E. & Särkikoski, T., 2005. *Suomalainen ydinvoimalaitos*. Helsinki: Edita Publishing Oy.
- Modarres, M., 2006. *Risk Analysis in Engineering: Techniques, Tools, and Trends*. Boca Raton, Florida: CRC/Taylor & Francis.
- NEA, 2002. *Improving Versus Maintaining Nuclear Safety*, Ranska: OECD Nuclear Energy Agency.
- NRC, 1975. *Reactor Safety Study: An Assessment of Accident Risks in U.S. Commercial Nuclear Power Plants*, Washington: U.S. Nuclear Regulatory Commission.
- Rösli, B., 1995. Data Application at Leibstadt Nuclear Power Plant: Time-dependent Analysis. *Proceedings of the International Workshop on Reliability Data Collection in Support of PSA, Maintenance and Life-assurance Programmes*. Toronto, Kanada: OECD Nuclear Energy Agency, 313-319.
- Scandpower AB, 2012. *RiskSpectrum Analysis Tools - Theory Manual*.
- Sim, S. H., 1987. Reliability of Standby Equipment with Periodic Testing. *IEEE Transactions on Reliability*, 36(1):117-123.
- Sirén, S., 2013. *TTKE:n Riskitietoinen Rarkastus: Koestusvälit*, Espoo: Fortum/Technical Support.
- Säteilyturvakeskus, 2013. *Ydinvoimalaitoksen Todennäköisyysperusteinen Riskianalyysi ja Riskien Hallinta, OHJE YVL A.7*, Helsinki: STUK.
- van der Borst, M. & Schoonakker, H., 2001. An Overview of PSA Importance Measures. *Reliability Engineering and System Safety*, 72:241-245.
- Vaurio, J. K., 1997. On Time-dependent Availability and Maintenance Optimization of Standby Units Under Various Maintenance Policies. *Reliability Engineering and System Safety*, 56:79-89.
- WNA, 2014. *Information Library*.  
 Saatavilla: <http://world-nuclear.org/Information-Library/>  
 (haettu 24.2.2014).

## Liitteet

### Liite 1: Vuodenaikariippuvien perustapahtumien kuukausikohtaiset todennäköisyydet

Perustapahtuma	Perustapahtumien kuukausikohtaiset todennäköisyydet											
	Tammikuu	Helmikuu	Maaliskuu	Huhtikuu	Toukokuu	Kesäkuu	Heinäkuu	Elokuu	Syyskuu	Lokakuu	Marraskuu	Joulukuu
SEALEV<-02	4,50E-02	3,85E-02	3,37E-02	3,37E-02	3,85E-02	1,69E-01	8,99E-01	3,00E-01	8,99E-02	5,40E-02	4,50E-02	5,40E-02
SEALE<-05	4,50E-03	3,85E-03	3,37E-03	3,37E-03	3,85E-03	1,69E-02	8,99E-02	3,00E-02	8,99E-03	5,40E-03	4,50E-03	5,40E-03
SEALEV>+1	8,44E-03	1,66E-03	1,92E-03	9,23E-05	1,70E-05	1,05E-05	8,93E-05	1,07E-04	5,99E-04	1,29E-03	3,45E-03	6,33E-03
SEALEV>-02	9,48E-01	9,61E-01	9,66E-01	9,68E-01	9,63E-01	8,33E-01	1,02E-01	7,02E-01	9,11E-01	9,46E-01	9,53E-01	9,41E-01
SUMMERTIME	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
WINTERTIME	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00
ALGAE	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	3,29E-03	3,29E-03	3,29E-03	3,29E-03	3,29E-03	8,22E-03	8,22E-03	0,00E+00	0,00E+00
FIRESW	5,00E-01	5,00E-01	5,00E-01	5,00E-01	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	5,00E-01	5,00E-01	5,00E-01

## Liite 2: Vuodenaikariippuvien alkutapahtumien kuukausikohtaiset taajuudet

Alkutapahtuma	Alkutapahtumien kuukausikohtaiset taajuudet (1/a)											
	Tammikuu	Helmikuu	Maaliskuu	Huhtikuu	Toukokuu	Kesäkuu	Heinäkuu	Elokuu	Syyskuu	Lokakuu	Marraskuu	Joulukuu
IALGAE	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,20E+00	1,20E+00	1,20E+00	1,20E+00	1,20E+00	3,00E+00	3,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
IFRICE	1,74E-02	1,74E-02	5,22E-02	5,22E-02	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	5,22E-02	5,22E-02	1,74E-02
ILIGHTA	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,65E-06	6,59E-06	1,24E-05	1,24E-05	6,59E-06	6,59E-06	1,65E-06	1,65E-06	0,00E+00
ILIGHTB	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,65E-07	6,59E-07	1,24E-06	1,24E-06	6,59E-07	6,59E-07	1,65E-07	1,65E-07	0,00E+00
IOILSLICK	3,38E-04	3,38E-04	2,03E-03	2,03E-03	2,23E-03	2,23E-03	2,23E-03	2,23E-03	2,23E-03	2,03E-03	2,03E-03	3,38E-04
ISEAL2	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,41E-06	9,94E-05	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
ISEAL25	6,75E-06	1,26E-07	1,08E-05	4,58E-08	4,96E-10	6,61E-12	8,13E-09	3,13E-09	9,92E-08	1,25E-07	2,61E-06	3,44E-06
ISEAL3	9,76E-07	8,31E-09	2,98E-06	5,64E-09	2,38E-11	8,82E-14	5,69E-10	1,50E-10	8,48E-09	8,96E-09	3,71E-07	4,38E-07
IWIND45	7,21E-08	7,21E-08	7,21E-08	7,21E-08	1,20E-06	1,20E-06	2,47E-06	2,47E-06	1,20E-06	4,98E-07	7,21E-08	7,21E-08
IALW39	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	4,32E-04	6,73E-05	6,73E-05	6,73E-05	6,73E-05	1,68E-04	1,08E-03	0,00E+00	0,00E+00
IALSNW39	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,55E-04	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	3,87E-04	0,00E+00	0,00E+00
IFRSNW39	4,72E-06	4,72E-06	1,41E-05	1,41E-05	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,41E-05	1,41E-05	4,72E-06
IFRW39	9,43E-06	9,43E-06	2,83E-05	2,83E-05	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,83E-05	2,83E-05	9,43E-06
ISNW39	4,65E-04	4,65E-04	4,65E-04	4,65E-04	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	4,65E-04	4,65E-04	4,65E-04